



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsandus- ja maaehitusinstituut

**Denis Pappel**

**TÖÖSTUSLIKUST KANEPIST  
SOOJUSISOLATSIOONIMATERJALIDE OMADUSTE  
UURIMINE**

**STUDYING CHARACTERISTICS OF THERMAL INSULATION  
MATERIALS FROM INDUSTRIAL HEMP**

Magistritöö  
Maaehituse õppekava

Juhendajad: Nooremteadur Martti-Jaan Miljan  
Professor Jaan Miljan

Tartu 2017

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Denis Pappel		Õppekava: maaehitus	
Pealkiri: Tööstuslikust kanepist soojusisolatsioonimaterjalide omaduste uurimine			
Lehekülgi: 117	Jooniseid: 44	Tabeleid: 18	Lisasid: 5
Osakond:		Maaehituse osakond	
Uurimisvaldkond:		Soojusisolatsioonimaterjalid	
Juhendaja(d):		Nooremteadur Martti-Jaan Miljan Professor Jaan Miljan	
Kaitsmiskoht ja aasta:		Tartu 2017	
<p>Magistritöö põhiliseks eesmärgiks oli uurida kanepist soojustusmaterjale ja nende omadusi. Uuringuid tehti katseliselt ja on uuritud antud teemaga seotud kirjandust.</p> <p>Kirjanduspõhises uurimuses antakse ülevaade kanepi kasutusvõimalustest üldiselt ning keskendutakse ehituses kasutatavatele soojustusmaterjalidele. Praktilise tööna viidi läbi survetugevuse-, kanepiluu vajumise- ja adsorptsiooni katsed ning määrati materjalide soojuserijuhtivused. Katsete käigus määrati uuritavate materjalide tihedused ja niiskussisaldused. Kirjeldatud on ka kõik katsete meetodid ning viidatud on vajalikele standarditele, mida katsete läbiviimiseks kasutati. Samuti on välja toodud erinevaid probleeme, mis katsete ajal tekkisid, et edaspidistes uuringutes oleks võimalik nende tekkimist ennetada.</p> <p>Soojusvoo katsed kanepivillaga viidi läbi Eesti Maaülikoolis ja Läti Põllumajandusülikoolis selleks, et võrrelda kahe erineva meetodikaga määratud tulemusi. Eesti Maaülikoolis katsetati kanepivilla ja kanepiluu kergbetooni ning võrdluseks ka muid looduslikke soojustusmaterjale.</p> <p>Survetugevuse katsetega uuriti erinevate kanepiluu kergbetoonide mehaanilisi omadusi. Analüüsimisel näidati, millised segutüübid on tugevamad ja millised nõrgemad. Uuriti ka tiheduse ja survetugevuse vahelist seost.</p> <p>Kuna puistematerjali kasutamisega kaasnevad ohud materjali vajumise osas, siis viidi läbi kanepiluuga vajumiskatsed ja võrreldi tulemusi teiste uurimustega.</p> <p>Adsorptsioonikatse eesmärgiks oli uurida kanepist ehitusmaterjalide niiskuseimavust. Kuna niiskus materjalis vähendab soojusisolatsiooni võimet, on see väga oluline näitaja. Saadud andmete põhjal koostati adsorptsioonigraafikud ja toodi eraldi välja materjalide tasakaaluniiskuse protsendid erinevate suhtelise õhuniiskuse tasemete juures.</p>			
Märksõnad: kanep, kanepiluu kergbetoon, soojuserijuhtivus, vajumine, adsorptsioon.			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Denis Pappel		Specialty: rural building	
Title: Studying characteristics of thermal insulation materials from industrial hemp			
Pages: 117	Figures: 44	Tables: 18	Appendixes: 5
Department:		Department of Rural Building	
Field of research:		Thermal insulation materials	
Supervisors:		Junior researcher Martti-Jaan Miljan Professor Jaan Miljan	
Place and date:		Tartu 2017	
<p>The main objective of this master's thesis was to study different insulation materials from hemp and their properties. The research was carried out by doing experiments and studying literature on this topic.</p> <p>Literature based study provides an overview of the potential uses of hemp in general and the basic focus was on the thermal insulation materials used in construction. Compression strength-, hemp shives settlement- and adsorption tests were carried out. Thermal conductivity of materials was also determined. During these tests moisture contents and densities of all materials were determined. All test methods are also described and references have been made to appropriate standards, which were used to conduct these tests. Some problems are outlined that arose during experiments, so that in further researches their occurrence can be prevented.</p> <p>Heat flow tests were conducted with hemp wool in Estonian University of Life Sciences and in Agricultural University of Latvia in order to compare results from two different test methods. Hemp wool, hemp shives, hemp concrete and some other natural insulation materials were tested in Estonian University of Life Sciences.</p> <p>Compressive strength tests were carried out to examine mechanical properties of hemp concrete. Analysis showed which mixtures were stronger and which ones weaker. The relationship between density and compressive strength has also been studied.</p> <p>As loose-fill insulation has risk of being settled, tests of impact excitation were carried out and results were compared with other studies.</p> <p>To assess adsorption of air moisture by hemp materials, adsorption tests were carried out. As the moisture content in the material reduces the thermal insulating ability, it is a very important parameter. The adsorption isotherms were drawn using obtained data. Equilibrium moisture content at different relative humidity levels for test specimens were also shown.</p>			
Keywords: hemp, hemp concrete, thermal conductivity, settlement, adsorption.			

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	5
1. KANEPITAIM JA SELLE KASUTAMINE .....	7
1.1. Kanepitaimede kirjeldus .....	7
1.1.1. Kanepitaimest toorained ja nende kasutamine Euroopa Liidus.....	9
1.2. Hoone välispiiretele ja sisekliimale esitatavad nõuded Eestis .....	11
1.3. Kanepi kasutamine ehituses soojustusmaterjalina .....	12
1.3.1. Kanepivill .....	12
1.3.2. Kanepiluu kergbetoon.....	14
1.3.3. Kanepiplaat .....	21
1.3.4. Kanepiluu .....	22
1.4. Uurimustöö kanepiluu kergbetooni soojus-niiskus režiimi kohta katsemajas.....	23
2. SURVETUGEVUSE KATSED .....	28
2.1. Katsekehade valmistamine.....	28
2.2. Katsetoodika ja kasutatavad seadmed.....	29
2.3. Katse tulemused .....	32
3. KANEPILUU VAJUMISE KATSE.....	35
3.1. Katsetoodika .....	35
3.2. Katse tulemused .....	38
4. SOOJUSERIJUHTIVUSE MÄÄRAMINE .....	43
4.1. Katsed Läti Põllumajandusülikoolis .....	43
4.1.1. Katsekehad.....	43
4.1.2. Katsetoodika ja kasutatavad seadmed .....	44
4.1.3. Katse tulemused.....	46
4.2. Katsed Eesti Maaülikoolis .....	48
4.2.1. Katsekehad.....	48
4.2.2. Katseseadmed ja arvutusvalemid.....	49
4.2.3. Katsetoodika .....	53
4.2.4. Katsete tulemused.....	57
4.3. Läti Põllumajandusülikooli ja Eesti Maaülikooli katseseadmetega määratud kanepivilla soojuserijuhtivused .....	62
5. ADSORPTSIOONI KATSE .....	64
5.1. Katsekehad .....	64
5.2. Katsetoodika ja kasutatavad seadmed.....	65
5.3. Katse tulemused .....	67
KOKKUVÕTE .....	70
VIIDATUD KIRJANDUS .....	73
SUMMARY .....	76
LISAD .....	79
Lisa 1 — Survetugevuse katsete tulemused .....	80
Lisa 2 — Kanepiluu vajumiskatse mõõtmispunktide vajumise graafikud .....	88
Lisa 3 — Kanepivilla soojusvoo katse Läti Põllumajandusülikoolis .....	96
Lisa 4 — Soojusvoo katsed Eesti Maaülikoolis .....	97
Lisa 5 — Adsorptsiooni katsekehade andmed .....	116

## SISSEJUHATUS

Aastal 2000 elas maailmas umbes 6,1 miljardit inimest ning aastal 2015 oli see arv tõusnud 7,2 miljardini. 15 aastaga kasvas rahaarv peaaegu 20%. Pidevalt suureneva maailma rahvastiku vajaduste ja nõudluste rahuldamiseks suurenevad ka kõigi tööstusvaldkondade tootmismahud. Suureneb nõudlus toidule, tehnikale, tarbeesemetele ja ka eluasemele. Suurenev tootmine tähendab suuremat ressursside kasutamist ja negatiivset keskkonnamõju. Kanepi taimest saadav toormaterjal on niivõrd mitmekülgne, et sellele leidub kasutusvõimalusi erinevates tööstusvaldkondades.

Ehitusmaterjalide tootmine võtab enda alla suure osa maailma tööstusest. Mida rohkem elab maailmas inimesi, seda rohkem on vaja ehitada, seega järjest rohkem tuleb toota ehitusmaterjale. Ehituses kasutatavate materjalide valmistamiseks on vaja hankida tooraineid, neid transportida, töödelda, valmistada neist ehitustooted ning seejärel uuesti ja uuesti transportida. Enamus ehitusvaldkonnas kasutatavatest materjalidest ja ehitusvahenditest baseeruvad mittetaastuvatel ning mitte kohalikel loodusressurssidel. Tänu järjest rangemaks muutuvatele regulatsioonidele ehituses ei ole alati võimalik kasutada alternatiivseid ehitusmaterjale. Samuti paljudes olukordades ei võimalda ehitise suurus ja keerukus kasutada keskkonnasõbralikke lahendusi. Kuid jätkusuutlikkust silmas pidades on vaja üritada leida võimalusi ja kohti, kus saab sünteetilisi ehitusmaterjale asendada looduslikega. Kuna nõudlus looduslikele materjalidele suureneb, tekib ka rohkem tootjad, kes panustavad taastuvate ja kohalike toorainete kasutamisele ehitusmaterjalide tootmisel. Üheks selliseks looduslike ehitusmaterjalide tooraineks on kanepi taim.

Üsna levinud on arusaam, et sõna „kanep“ viitab psühhotroopse mõjuga taimele. Nagu paljude teiste taimede puhul on ka kanepil erinevate omaduste ja kasutusotstarvetega liigid. Kanepit on võimalik kasutada ka ehituses mitmel moel. Näiteks kanepikiust valmistatakse soojustuseks villaplaate ja kanepiluust saab teha kergbetooni, mis on heade soojusisolatsiooni omadustega. Neid materjale kasutades on võimalik saavutada häid tulemusi, mis on võimelised vastama tänapäeva karmidele ehitusnõuetele.

Kuna kanep on võimeline kasvama väga erinevates kliimatingimustes on sellest taimest valmistatavaid ehitusmaterjale võimalik toota väga erinevates maailma osades. Kohaliku materjali tootmise eeliseks on see, et transportimise arvelt vähendatakse materjali tootmiseks kuluvat sisendenergiat, mis võib suurendada toote hinda ja kahjustab keskkonda.

Käesoleva magistritöö esimeseks eesmärgiks on anda ülevaade kanepi kasutusvõimalustest nii ehituses kui ka muudes valdkondades. Ehitusvaldkonna puhul on keskpunktis soojustusmaterjalid, kuna hoonete soojustamine kanepist ehitusmaterjalidega on tänapäeva ehituses selle taime põhirakendus. Esimene peatükk on koostatud enamasti rahvusvahelise kirjanduse põhjal kuid on kasutatud ka Eesti kirjandusallikaid. Praktilise tööna on läbi viidud erinevad katsed kanepist soojustusmaterjalidega. Kirjeldatud on kõiki kasutatud katsemetoodikaid ja on antud hinnang saadud tulemustele. Läbiviidud katsete eesmärgiks on uurida kanepist soojustusmaterjalide erinevaid omadusi ning teha järeldusi nende materjalide kasutamise kohta konstruktsioonides.

Teises peatükis on uuritud kanepiluu kergbetooni survetugevust. Katsekehade purustamiseks kasutati kolme erinevat pressi. Andmete analüüs keskendub survetugevuse ja segutüübi ning tiheduse vahelistele seostele. Kolmandas peatükis on kirjeldatud kanepiluu vajumiskatsed. Läbi viidud on kukkumislauaga katsed tihendatud ja tihendamata kanepiluuga. Kukkumislauaga tehti 45 mm ja 12 mm kukkumisi ning katseseinaelementidena kasutati OSB plaatidest valmistatud kaste sisemõõtudega 200x400x1000 mm. Neljandas peatükis on kirjeldatud katsekehade soojusvoo katset Eesti Maaülikoolis ja kanepivilla puhul on soojuserijuhtivus määratud ka teise meetodikaga Läti Põllumajandusülikoolis. Soojusvoo mõõtmiseks kasutati Eesti Maaülikoolis kliimakambrit Feutron 3007-5 ning Läti Põllumajandusülikoolis katseseadet HFM 436/3/1/E Lambda. Võrreldud on katsekehade soojuserijuhtivusi ning selle seost materjali tihedusega. Viiendas peatükis määratakse katsekehade adsorptsiooni kliimakambri meetodil. Kliimakambri Rumed Type 3401 katsetati erinevaid kanepist soojustusmaterjale. Toodud on katsekehade tasakaaluniiskused erinevate suhtelise õhuniiskuse tasemete juures ning koostatud on adsorptsiooni graafikud.

Magistritöö autor tänab kõiki, kes panustasid käesoleva lõputöö valmimisele. Autor tänab eraldi Urmas Terrast, kes valmistas osad uurimustöös kasutatud kanepiluuga kergbetooni katsekehadest. Autor tänab ka Läti Põllumajandusülikooli füüsika kateedri juhatajat Uldis Grossi, kellega viidi läbi kanepivilla soojuserijuhtivuse määramise katsed Lätis.

# 1. KANEPITAIM JA SELLE KASUTAMINE

## 1.1. Kanepitaimede kirjeldus

Kõige hilisematest aegadest, millal inimesed hakkasid tegelema tootmisega, oskasid nad kasutada ka kanepit kasutuskõlblike esemete valmistamiseks. Mõõdunud on tuhandeid aastaid sellest ajast kui valmisid esimesed kanepist tarbeesemed. Tõendeid kanepi kasutamise kohta on leitud Hiinast lausa 8000. aastatest e.m.a. Mitmed allikad loevad kanepi päritolupiirkonnaks Kesk-Aasiat kuid kogu inimkonna ajaloo jooksul on seda taimet kasvatatud üle terve maailma. Väga kaua aega on see taim olnud inimeste jaoks üks tähtsamaid kaupade valmistamise tooraineid. Kanepist valmistati riideid, köit, laevadele purjeid, toitu ja palju muud. Kasutati ka meditsiinis ning rituaalides mediteerimise eesmärkidel. (Allegret, 2013)

Kanepi liigid ja sordid on erinevate omadustega, kasvamise ja valmimise perioodidega ning neist valmistatakse erinevaid tooteid. Kõige rohkem neist on tuntud roosilaadsete (*Rosales*) seltsi ja kanepiliste (*Cannabaceae*) sugukonda kuuluv kanepi perekond *Cannabis sativa* L., mis omakorda jaguneb kolmeks alaliigiks: 1) *Cannabis sativa*, 2) *Cannabis ruderalis*, 3) *Cannabis indica*. (Brigitte jt, 2013). Kanepitaimede alaliigid on esitatud joonisel 1.1.



**Joonis 1.1.** Kanepi perekonna kolm alaliiki. Vasakult paremale: 1) *Cannabis sativa* (harilik kanep); 2) *Cannabis ruderalis* (metsik kanep); 3) *Cannabis indica* (india kanep) (Vancouver Seed Bank, 2014)



*Cannabis Sativa* (harilik kanep) on kanep, mida kasutatakse kõige rohkem tööstuses seega nimetatakse seda taime ka tööstuslikuks kanepiks. See on kahekojaline ja üheaastane taim, mis kasvab kuni 4 m kõrguseks. Taime varred enamasti ei kahestu ja omavad hõredat lehestikku. Lehed hargnevad kolmeks kuni üheksaks võrseks, mis on 7 kuni 15 cm pikad (joonis 1.2). Vars on 3 kuni 30 mm läbimõõduga ja varre niinekihis on 13,5 kuni 19,5% kiudu. Vars on pehme ja lihav esimeses kasvustaadiumis ja see hiljem puitub. Puitumine algab varre alumisest osast. Psühhotroopse aine (THC) sisaldus on väga madal, kuni 0,2% ja seda alati ei esinegi. Tööstuslik kanep jaguneb omakorda kolmeks vormiks. Üks vorm on põhjamaine, varre pikkusega 0,6 kuni 0,8 m ja valmib 60 kuni 70 päevaga. Varre ja seemnete saak on väike. Lõunamaine kanep on 3 kuni 4 m kõrge ning valmib 130 kuni 180 päevaga. Taime saagikus on suur, aga seemneid saab neist vähe. Kiud on peenikesed. Vahepealne vorm on 1,5 kuni 2,5 m kõrge ja valmib 90 kuni 120 päevaga ning kiu- ja seemnete saak on hea. (Khestl, 2009)



**Joonis 1.2.** Kolme alaliigi kanepi lehtede erinevus. Vasakult paremale: 1) *Cannabis sativa* (harilik kanep); 2) *Cannabis ruderalis* (metsik kanep); 3) *Cannabis indica* (india kanep) (Weed Homie, 2017)

*Cannabis ruderalis* (metsik kanep) on madalakasvuline, umbes 0,5 m kõrge ja peene, kergelt kiulise varrega. Lehestik ei ole eriti tihe ja lehed on suhteliselt suured (joonis 1.2). Psühhotroopsete ainete (THC) sisaldus on madal või keskmine. (Khestl, 2009)

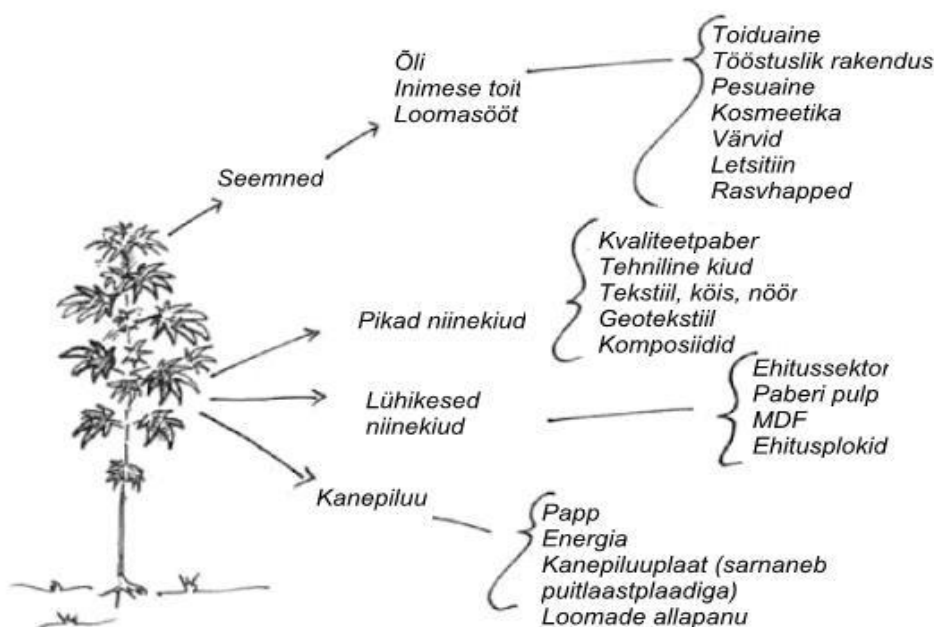
*Cannabis Indica L.* (india kanep) taimed on madalad, kuni 1,2 m kõrgused. Nad on väga tihedad ja nende varred ei ole väga kiurikkad. Taime varred kahestuvad ning nende lehestik on tihe. Psühhotroopsete ainete sisaldus on väga kõrge. Kanepis sisalduvad psühhotroopsed kannabinoidid, millest põhiline on tetrahüdrokannabinool (THC). (Khestl, 2009)



Erinevate tarbekaupade valmistamiseks kasutatakse enamasti harilikku kanepit. See on üheaastane taim, mida külvatakse kevadel ja lõigatakse suve lõpus või sügise alguses. Lääne-Euroopa ilmastiku tingimustes jääb vegetatiivne periood vahemikku 80...150 päeva. Külvamiseks peab pinnas olema toitainete rikas ja tasane ning kanepit ei tohiks külvata niisketel aladel. Kuna tööstuslik kanep kasvab väga kõrgeks ja on kiire kasvuga, siis umbrohi ei jõua kanepipõllul sirguda ja hävib. Kanepi lühike vegetatiivne periood soodustab selle põllukultuuride külvikorra rotatsiooni integreerimist. Kanep on sitke taim ja selle koristamine on raske. Taimejäänused võivad koristusmasina osade vahele kinni jääda. Üldiselt on võimalik kanepi külvamine ja koristus tava seadmetega, aga on olemas ka spetsiaalselt kanepi koristamiseks mõeldud tehnika. (Desanlis jt, 2013).

### 1.1.1. Kanepitaimest toorained ja nende kasutamine Euroopa Liidus

Kanep on multifunktsionaalne taim, millest on võimalik saada kiudu, kanepiluud ja seemneid. See tähendab, et nõudluse olemasolul ja õigesti talitledes on võimalik kogu taim täielikult ära kasutada. Jooniselt 1.3 näeme kui laialdased võimalused on kanepi kasutamiseks.



**Joonis 1.3.** Kanepitaimest kasutusvõimalused (Amaducci, Gusovius, 2010)

Joonisel 1.3 olevalt skeemilt on näha, et seemneid kasutatakse peamiselt toidu ja toiduainete valmistamisel ning loomasöödaks. Väike osa seemnetest pressitavast õlist kasutatakse näiteks kosmeetika ja pesuaine valmistamiseks. Kanepikiude kasutatakse peamiselt soojustusmaterjali, paberi pulbi, biokomposiidide ja tehniliste tekstiilide tootmisel. Kanepiluust valmistatakse loomadele kõrge kvaliteediga allapanu, kuid märkimisväärne osa leiab kasutust ka ehituses soojustusmaterjalide valmistamisel. (Carus jt, 2013)

Selleks, et kiud varrest paremini eemalduksid kasutatakse taimede leotamist. Leotamine tähendab, et kanepitaimed või seemneteta varred pannakse lahusesse seisma. Lahuses kasutatakse näiteks naatriumhüdroksiidi, naatriumkarbonaati või naatriumsulfiidi ning leotada võib ka jooksvas vees. Kõige lihtsam ja odavam moodus leotamiseks on jätta ilma seemneteta kanepivarred põllule (2-8 nädalaks), kus leotamine toimub vihma ja õhuniiskuse mõjul. Selle protsessiga üritatakse eemaldada ja lagundada kleepuvaid aineid (eriti pektiini), mis ühendavad kiudusid nii omavahel kui ka varrega. Seejärel tuleb varred kuivatada ning kiud eraldatakse varre küljest mehaanilisel teel. Kõige tüüpilisem mehaanilise eraldamise meetoditest on varte spetsiaalsete rullide vahelt läbi laskmine, mis purustavad selle sisemise osa ja eraldavad kiud kanepiluust. Täpne eraldamise meetodi valik sõltub sellest, millise kvaliteediga kiudu soovitakse saada ja kus seda plaanitakse kasutada. (Horne, 2012)

Paljudes riikides, kus kanepit kasvatatakse peamiselt kiu saamise eesmärgil on seemned ja luu teisejärgulised toorained. Aastal 2010 kasvas Euroopa Liidus kanep 10 480 hektaril. Sellelt alalt saadi 76 095 tonni vart, 5 991 tonni seemet ja 7,5 tonni õisi. Õisi kasutatakse meditsiinis ning eeterlikku õli valmistamiseks. Varred töödeldi ja saadi 25 589 tonni kiudu ning 43 621 tonni luud. Samuti tekkis 11 439 tonni tolmu/puru, mida kasutati 20% ulatuses põletamiseks pelletite kujul ning 80% muudeks kasutusotstarveteks. (Carus jt, 2013)

Koorimata seemned meenutavad välimuselt pähkleid ning need on kõrge toiteväärtusega. 2010. aastal kasutati Euroopa Liidus suurem osa seemnetest (72,3%) koorimata seemnetena ja enamus neist läks loomasöödaks. Õli tootmiseks kasutati 15% ja kooritud seemneid tarbiti 11,7%. (Carus jt, 2013)

Suurim osa Euroopa Liidus toodetud kanepikiust kasutatakse paberitööstusele pulbi valmistamiseks. Kanepikiust pulpi kasutatakse näiteks sigarettide paberite valmistamiseks.

Aastal 2010 kasutati 55% kanepikiudu pulbi valmistamiseks, 26% soojusisolatsiooniks, 15% läks biokomposiitideks ja 4% kasutati tehniliste tekstiilide tootmiseks. Biokomposiite kasutatakse näiteks autotööstuses sisustuselementide valmistamiseks. Tehnilised tekstiilid on näiteks multš kangas ja geotekstiil. (Carus jt, 2013)

Kanepiluud kasutatakse kõige enam loomade allapanuna. Euroopa Liidu 2010. aasta kanepiluu toodangust kasutati 46% hobuste allapanuks ja 17% muude loomade allapanuks (nt. kanad). Ehitussektoris kasutati 15% kanepiluust ja ülejäänud 22% kasutati muudel eesmärkidel. Muude eesmärkide hulka kuulub näiteks energia tootmine materjali põletamisega. (Carus jt, 2013)

## **1.2. Hoone välispiiretele ja sisekliimale esitatavad nõuded Eestis**

Kuna käesolev magistritöö keskendub soojustusmaterjalide uurimisele, siis on oluline teada, millised on Eestis kehtivad nõuded nende materjalide konstruktsioonis kasutamiseks. Selleks, et looduslikke soojustusmaterjale saaks kasutada ehituses peavad need vastama Eestis kehtivatele regulatsioonidele. Soojusisolatsioonimaterjalid on olulised hoone soojapidavuse, heliisolatsiooni ja sisekliima reguleerimise seisukohalt.

Hoone välispiire peab olema piisavalt soojustatud ja pikaajaliselt õhkupidav. Otstarbeka soojustuse määramisel lähtutakse hoone energiatõhususe nõuetest, ruumi soojuslikust mugavusest ja hallituse ning kondensaadi vältimisest konstruktsioonis. Ruumi soojusliku mugavuse tagamiseks, ei või piirde soojusläbivus ( $U$ -arv) olla suurem kui  $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Sellest väärtusest suurema soojusläbivusega avatäite olemasolul tagatakse soojuslik mugavus kütelahendusega. Optimaalse soojustuskihi paksuse määramisel tuleb arvestada ka vabasoojusega. (RT I, 28.02.2017, 2)

Elamu välispiirde valikul võib esmase lähenemisega lähtuda järgmistest väärtustest:

- välisseina soojusläbivus –  $0,12 - 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;
- katuse ja põranda soojusläbivus –  $0,1 - 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;
- akna ja ukse soojusläbivus –  $0,6 - 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ . (RT I, 28.02.2017, 2)

Mitteelamu välispiirde valikul võib esmase lähenemisega lähtuda järgmistest väärtustest:

- välisseina soojusläbivus – 0,15 - 0,25 W/m<sup>2</sup>K;
- katuse ja põranda soojusläbivus – 0,1 - 0,2 W/m<sup>2</sup>K;
- akna ja ukse soojusläbivus – 0,6 - 1,1 W/m<sup>2</sup>K. (RT I, 28.02.2017, 2)

Hoone välispiirde keskmine õhulekkearv ei tohi ületada üht kuupmeetrit tunnis välispiirde ruutmeetri kohta. Niiskuse konvektsiooni riski vältimiseks tuleb tarindi kriitilised sõlmed lahendada võimalikult õhupidavatenä. (RT I, 28.02.2017, 2)

Kaugküttevõrgust või hoone katlamajast köetavas eluruumis ei tohi siseõhu temperatuur inimese pikemaajalisel ruumis viibimisel olla madalam kui 18 °C. Siseõhu temperatuuri lubatav ülempiir tuleb määrata kehtestatud nõuete alusel. Eluruumi siseõhu optimaalne suhteline niiskus on 40 - 60%. Väljastpoolt eluruumi paiknevast allikast lähtuva müra helirõhu tase eluruumis ei tohi päeval ületada 40 detsibellist ja öösel ületada 30 detsibellist taset. (RT I, 03.07.2015, 34)

### **1.3. Kanepi kasutamine ehituses soojustusmaterjalina**

#### **1.3.1. Kanepivill**

Esimesed kanepivilla tooted soojustusmaterjalina võeti kasutusele aastal 1998. Sellest ajast alates on selle materjali tootmise ja kasutamise tehnoloogia jäänud samaks. Kanepivilla tootmiseks on vaja ühendada kanepikiud kuumusel sulava kiuga, enamasti polüestriga. Protsess vajab ühtlast segu kahest kiust. Seda on vaja, et valmistada õhuline matt. Segu ühtlus on väga oluline lõpptootte kvaliteedi seisukohast. (Arnaud jt, 2013)

Villamatt valmistatakse mehaanilise või pneumaatilise kraasimisega ning seejärel liigub matt kahe rulliku vahelt läbi ja pärast seda ahju. Selleks, et sulav kiud ühineks kanepikiuga ning kanepikiud jääks mõjutamata peab ahju pikkus ja selles olev temperatuur olema sobiv. Samuti on oluline mati liikumise kiirus ahjus. Kahe rulliku vaheline kaugus määrab mati paksuse. Ahjust väljumisel vill lõigatakse mõõtu ning jahutatakse. Kergem vill keeratakse tavaliselt rullidesse ning raskem ja tihedam lõigatakse plaatideks. (Arnaud jt, 2013)

Valmis kanepivill (joonis 1.4) on omaduste poolest üpriski sarnane teiste looduslike soojustusmaterjalidega (tabel 1.1) ning sünteetiliste villadega ja seda kasutatakse samadel eesmärkidel. Kuna villal on väike tihedus ning kiududes on palju õhku, on sellel materjalil väga head soojusisolatsiooni omadused. (Arnaud jt, 2013)



**Joonis 1.4.** Kanepivill

**Tabel 1.1.** Peamiste looduslike soojustusmaterjalide tehnilised näitajad (Kalamees, 2002)

Omadus	Linavill	Kanepivill	Saepuru	Höövilaast	Tselluvill
Tihedus [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	15...30...80	25...110...150	130...220	80...200	30...45...65
Soojuseriijuhtivus $\lambda$ [ $\text{W}/\text{mK}$ ]	0,049...0,033	0,055...0,033	0,062...0,072	0,055...0,065	0,041...0,050
Veeaurujuhtivus $d_p \times 10^{-12}$ [ $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ ]	75...240 (RH 35%→80%)	90 (RH 44%)	50...160 (RH 35%→85%)	50...120 (RH 35%→85%)	50...300 (RH 35%→85%)
Õhujuuhtivus $\times 10^{-6}$ [ $\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ ]	30...810	33...750	11...300	45...350	45...200

Märkus. Tabelil on suunav iseloom, kuna kõik näitajad sõltuvad materjali tihedusest ja ümbritsevast keskkonnast (temperatuur, õhuniiskus) ja võivad erineda ka tulenevalt toote valmistaja tootmistehnoloogiast.

Kanepivilla mikrostruktuurist tulenevalt on materjali  $40 \text{ kg}/\text{m}^3$  tiheduse juures selle soojuseriijuhtivus  $0,050 \text{ W}/\text{mK}$ . Villa 20 cm paksuse juures on selle soojustakistus  $R = 4 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ . (Arnaud jt, 2013)

Soojusjuhtivust mõjutab materjali veesisaldus. Villade omadus imada niiskust ja vee omadus juhtida energiat põhjustab materjali soojusjuhtivuse suurenemise. Villa niiskussisaldus sõltub ruumi õhutemperatuurist ja õhuniiskusest. Eksperimentaalselt on näidatud, et ruumides, kus on liiga kõrge õhuniiskus võib soojustusmaterjali soojusjuhtivus tõusta kuni 30%. Seega on oluline, et vill saaks pärast niiskuse imamist loomulikult välja kuivada, reguleerides sellega ruumi sisekliimat. (Arnaud jt, 2013)

Kuna kanepivill on väga õhuline ja poorne materjal, siis see imab kergesti niiskust. Ühes Prantsusmaal tehtud uurimustöös, milles uuriti kanepist ehitusmaterjalide poorsust on saadud kanepivilla, mille tihedus oli  $40 \text{ kg/m}^3$ , poorsuseks 97,5%. (Collet jt, 2007).

### **1.3.2. Kanepiluu kergbetoon**

Sideainete ja kanepiluu kokku segamisel on võimalik saada soojustusmaterjali. Kanepiluu kergbetoon on kanepist valmistatavatest ehitusmaterjalidest kõige suurema potentsiaaliga ning on kõige laialdasemalt kasutusel. Mujal maailmas kannab see materjal erinevaid nimesid nagu *hemcrete*, *hemcrete*, *hemp concrete* (kanepi betoon), *hemp cement* (kanepi tsement) või *hemp lime* (kanepi lubi). Materjali valmistamisel kombineeritakse mitu erinevat sideainet, et ära kasutada üksikute sideainete positiivseid omadusi.

Selle materjali põhikomponentideks on kanepiluu, kustutatud lubi, tsement ja hüdrauliline lubi. Viimaseid kahte lisatakse enamasti kivistumise protsessi kiirendamiseks. Putsolaanid (*pozzolans*) on samuti võimelised kiirendama lubja kivistumist seega on ka seda materjali võimalik kasutada lisandina kanepiluu kergbetoonis. Tüüpilisemad putsolaanid on metakaoliin, metallitööstuse räbu ja lendtuhk (nt. vulkaaniline tuhk). Kuna ühed nendest materjalidest tekivad looduslikul teel ja teised on mingi tootmisprotsessi jääkproduktid, siis nende lisamine kergbetooni tähendab väiksemat keskkonnamõju selle materjali kasutamisega. Putsolaanide lisamist kanepiluu kergbetooni veel uuritakse ning neil on potentsiaali asendada nii tsementi kui ka hüdraulilist lubja segus kuid kõik putsolaanid ei pruugi sobida selleks. (Walker, Pavia, 2014)

Kanepiluu kergbetooni ei ole võimalik kasutada kandvates konstruktsioonides. Materjal sobib karkass-seina täitmiseks. Karkassi täitmiseks võib kasutada ajutist või alalist raketist. Muutes kanepiluu ja sideainete vahekorda on võimalik saavutada erinevate omadustega materjali, mida on võimalik kasutada erinevates konstruktsioonelementides (Arnaud jt, 2013). Näiteks lisades segusse rohkem sideainet on võimalik saavutada tugevam segu, mida saab kasutada ka põrandate täitmiseks (joonis 1.5).



**Joonis 1.5.** Kanepiluu kergbetooni seguga põranda täitmine (Priesnitz, 2006)

Segus kasutatav kanepiluu peaks olema kuiv ja puhas. Seemned ja üleliigsed taime osad peaksid olema eemaldatud. Kui on kahtlust, et luu võib sisaldada liigset niiskust või mädanikku, siis seda materjali ei tohiks kasutada. Luu töötlemiseks ei ole otsest vajadust kui just ei kasutata seda lahtiselt ilma sideaineta. Segus olevad sideained peaksid andma piisava kaitse tulekahju korral ning bioloogiliste kahjustuste eest. (Bevan, Woolley, 2008)

Sideaine põhiosaks on kõige sobilikum lubi. Oma poorse struktuuri tõttu on lubi võimeline imama ja hoidma endas palju vett, kuid sama lihtsalt suudab ta selle vee vabastada ning välja kuivada. Tsemendi osakesed töötavad teisiti. Need ei ima vett endasse vaid niiskuse pääsemisel materjali struktuuri tsemendi osakesed kattuvad kondensaadiga. Probleemiks muutub see sellepärast, et tsemendi osakesed on nii väikesed ja väga tihedalt koos, et niiskuse pääsemisel osakeste vahele on sellel hiljem raske sealt välja kuivada. Tulemuseks on „mittehingav“



materjal. Selleks, et ära kasutada lubja poorsust ja tsemendi head ja kiiret tardumisvõimet tuleb kanepiluu kergbetoonis saavutada tasakaal kahe sideaine vahel. (Allin, 2005)

Hüdraulilist lubja lisatakse samal eesmärgil nagu tsementi. Katsetega on tõestatud, et kasutades kanepiluu kergbetooni segusid saavutatakse parem tulemus lubja ja lisanditega, kui ainult lubjaga. Tsementi ja hüdraulilist lubja lisades on lihtsam saavutada piisava tugevusega ja väiksema tihedusega segu. Samuti on nendega materjali paigaldamine lihtsam ning kivistumine kiirem. Oluline on see, et kui tardumise protsess on kiirem, on võimalik ka raketised varem eemaldada, et kivistumise protsessi kiirendada. (Bevan, Woolley, 2008)

Kergbetooni valmistamiseks on eelnevalt vaja valmis teha sideainete segu. Selleks tuleb lubi teiste lisanditega kokku segada. Tabelis 1.2 on antud erineva otstarbega sideainete segude mahuline koostis. Segu koostis sõltub mingil määral kliimatingimustest, materjali paigaldamise viisist ja selle kasutusotstarbest. Näiteks sooja ja kuiva ilmaga ning käsitsi paigaldamisel tuleks hoiduda kiiresti reageerivatest tsementidest ja hüdraulilistest lupjadest, kuna suuri materjali koguseid ei tohi ette valmis segada. Kui käsitsi paigaldamisel ei jõua valmis segu paigaldada, siis see tahkestub. Niiske ja jaheda ilmaga tuleks vähendada vee kogust, et kuivamise protsessi kiirendada. Pumba ja pritsi kasutamisel tuleks lisada segusse kiiresti reageerivaid ühendeid, kuna pritsitud materjal peab koheselt paigale jääma. Kui kanepiluu kergbetoonist sein jääb ilma lisaviimistluseta, siis võib kasutada valget tsementi, kuna nähtavale jääv valge värv võib olla hallist parema välimusega. (Allin, 2005)

Ühtlasema kergbetooni segu saavutamiseks tuleb kasutada õigeid segu valmistamise võtteid. Betooni seguauto kasutamisel tuleks mahutitäis vee ja sideainete segu valmis teha ja seejärel järk-järgult lisada kanepiluud. Horisontaalseid või vertikaalseid labasegisteid kasutades peab enne kokku segama kanepiluu koos sideainega ja seejärel lisada vett. (Arnaud jt, 2013)

**Tabel 1.2.** Sideaine segude valmistamise mahulised koostised kanepiluu kergbetooni jaoks (Allin, 2005)

Segu tüüp	Kustutatud lubi	Hüdrauliline lubi	Tsement
Soojustussegud	7	1,5	1,5
Krohvisegud	8,5	1,5 (NHL 3,5 / NHL 5)	-

Kanepiluu kergbetoonis kasutatav looduslik hüdrauliline lubi (*Natural Hydraulic Lime*) on lubjakivist toodetud pulberlubi, milles on silikaatide ja savide sisaldus oluliselt suurem tavalisest lubjakivist. Hüdrauliline lubi on saadaval erinevates kvaliteediklassides. Kõige tavalisemad nendest on NHL 2, mis on nõrgalt hüdrauliline, NHL 3,5 on keskmiselt hüdrauliline ja NHL 5 kõrge hüdraulilisusega. Hüdraulilisus näitab lubja võimet kivistuda vees ilma õhu juurdepääsuta. Erineva klassiga hüdraulilised lubjad on sobilikud kasutamiseks erinevates olukordades ning erinevates keskkonnatingimustes. Lühendile järgnev number näitab kivistunud materjali survetugevust [ $\text{N/mm}^2$ ]. (Conserv., 2017)

Kasutuskohi määrab ära milliseid koostisosi ja missuguses vahekorras kergbetooni valmistamiseks kasutatakse. Segu koostis seintes, põrandates, vahelagedes ning katuslagedes on erinev (tabel 1.3). Kergbetooni valmistamiseks on väljatöötatud ka spetsiaalsegud, näiteks Inglismaal valmistatav Tradical HB ja Prantsusmaal Batichanvre (Bevan, Woolley, 2008). Mõlemad tooted sisaldavad lupja, tsementi ning muid lisaaineid, mille täpset vahekorda ei avaldata (Bevan, Woolley, 2008).

**Tabel 1.3.** Kanepiluu kergbetooni segude mahulised koostised trummelsegumasina jaoks (Allin, 2005)

Koostisosa	Kerge segu (laed)	Seina segu	Põranda segu	Krohv (käsitsi krohvimiseks)	Krohv (krohviprits)
Kanepiluu	10	10	10	10	10
Sideainete segu	1	2,5	3	9	7
Vesi	3	4	4	5-6	5
Liiv	-	-	-	-	2
Jahvatatud lubjakivi	-	-	-	-	2

Lhoist Group on rahvusvaheliselt tegutsev ettevõtte, mis tegeleb kanepiluust kergbetooni lahenduste väljatöötamise, tootmise ja turustamisega. Nende kaubamärgiks ongi eelpool mainitud Tradical ja kergbetooni toote nimeks on Hemcrete. Tootevalikus on olemas kanepiluu ja spetsiaalsed pulbrilised sideaine segud. Tradical Hemcrete 300 mm, 400 mm ja 500 mm paksustee seinte U-väärtused on vastavalt  $0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$  ja  $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Ettevõtte poolt pakutavate segude ehitusfüüsikalised omadused on esitatud tabelis 1.4. (Lhoist Group, 2017)

Eestis on nõutud, et ruumi soojusliku mugavuse tagamiseks peab välispiire olema U-väärtusega vähemalt  $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Samuti, kuna soojustusmaterjali esmasel valikul peab seinu puhul lähtuma U-väärtusest  $0,12 \dots 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ , siis on tootja poolt deklareeritud Tradical Hemcrete soojusjuhtivused vastavuses Eesti Vabariigis kehtivate energiatõhususe miinimumnõuetega.

**Tabel 1.4.** Tradical Hemcrete toodete tehnilised näitajad (Lhoist Group, 2017)

Segu tüüp	Tihedus $\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	Soojuseriijuhtivus $\lambda \text{ [W/mK]}$	Survetugevus (90 päeva pärast) [MPa]
Seina segu	330	0,09	0,9
Põranda segu	375	0,11	1,1
Lae/katuslae segu	220	0,08	-
Krohvi segu	700-950	0,12-0,13	-

Tradical HB on sideaine, mis sisaldab kustutatud lubja, tsementi ning muid mineraalseid ja putsolaani lisaaineid. Sama ettevõtte pakub ka teisi sideaineid, millest üheks on Tradical PF70. See on pulbriline sideainete segu, mis koosneb 75% kustutatud lubjast, 15% hüdraulilisest sideainest ja 10% putsolaani sideainest. Tradical PF70 segu kasutatakse nii soojustussegude kui ka krohvide valmistamiseks. Selle tootega valmistatud soojustussegu seinte jaoks on tootja andmetel tihedusega  $330 \text{ kg/m}^3$  ja soojuseriijuhtivusega  $0,085 \text{ W/mK}$  ning katuste soojustamiseks tihedusega  $220 \text{ kg/m}^3$  ja soojuseriijuhtivusega  $0,06 \text{ W/mK}$ . (Lhoist Group, 2017)

Inglismaal läbiviidud uurimustöös kasutati Tradical PF70 kanepiluu kergbetooni uurimiseks. Katsetati nelja katsekeha, mille tihedused jäid vahemikku  $240 \dots 410 \text{ kg/m}^3$  ja nende soojuseriijuhtivuste vahemik oli  $0,057 \dots 0,086 \text{ W/mK}$ . (Page jt, 2017)

Šveitsi ettevõtte HES SA (*Hemp Eco Systems SA*) on samuti välja töötanud oma kanepiluu kergbetooni segud. Nende tootevalikusse kuulub kanepiluu, kustutatud lubi ja mineraalsete lisandite segu. Samuti on välja töötatud ka oma segumasin ning raketised kergbetooni paigaldamiseks. Ettevõtte pakub lahendusi kanepiluu kergbetooniga seinte, põrandate ja katuste soojustamiseks ning viimistlemiseks. HES soojustussegud ei sisalda tsementi ega hüdraulilist lubja vaid koosnevad kanepiluust, kustutatud lubjast ja looduslikest mineraalsetest lisanditest. Nagu ka Tradical toodete puhul ei ole HES lisandite täpseid koostisosi avaldatud. HES SA on oma materjaliga läbi viinud erinevaid standardite kohaseid uuringuid ning nende tulemused on avaldatud internetis ettevõtte kodulehel. Määratud on näiteks materjali tulekindlikkus ja toode

on klassifitseeritud klassi B-s1-d0. Segule, mis sisaldab 20 kg kanepiluud, 25 kg kustutatud lupja, 3 kg mineraalset lisandit ja 30-40 liitrit vett, määrati soojuserijuhtivus. Tulemuseks saadi, et kuivatamata materjali tihedus oli vahemikus 330-380 kg/m<sup>3</sup> ja keskmisel temperatuuril 10°C oli materjali soojuserijuhtivus 0,070 W/mK. Kuivatatud katsekeha tihedus oli 239 kg/m<sup>3</sup> ning keskmisel temperatuuril 10°C saadi soojuserijuhtivuseks 0,057 W/mK. (Hemp Eco Systems, 2017)

Kanepiluu kergbetoonil on potentsiaali toimida paremini kui tavalistel soojustusmaterjalidel. Näiteks paigaldatakse kanepiluu kergbetooni monoliitsena puidust karkassi vahele või lahendusena, kus kandev karkass on monoliidi keskel. Viimane lahendus võimaldab vähendada külmasildade tekkimist ja kaitseb ka puitkonstruktsiooni (joonis 1.6) tule ja bioloogiliste kahjurite eest. (Bevan & Woolley, 2008)



**Joonis 1.6.** Seina soojustamine kanepiluu kergbetooniga Tradical Hemcrete (American Lime Technology, 2017)

Dr. Arnaud Evrard ja professor A. De Herde Leuveni katoliku ülikoolist (*Université catholique de Louvain*) on uurinud selle materjali hügroskoopsust nii katsemeetodil kui ka

arvutisimulatsioone kasutades. Nende poolt saadud tulemused näitavad, et materjal imab niiskust kui õhuniiskus on suur ja vabastab niiskuse kui õhuniiskus langeb. Selline käitumine reguleerib õhuniiskust siseruumis ning väldib niiskuse kondenseerumist. (Bevan, Woolley, 2008)

Kanepiluu kergbetooni omaduste hulka kuulub kõrge poorsuse tõttu hea veeauru läbilaskvus. Kuna selle materjali erinevaid segutüüpe on palju on ka nende poorsus erinev. Näiteks on uuritud tavaliselt kasutatavaid segusid tihedusega 258...463 kg/m<sup>3</sup> ning on määratud, et nende poorsus on vahemikus 72...85%. Kanepiluu kergbetoon on väga niiskustimav materjal, mis suudab imada ning endast läbi lasta palju veeauru. Selline omadus tagab ühtlasema õhuniiskuse taseme siseruumis kuid mõjub negatiivselt materjali soojustusomadustele. Näiteks ühes uurimustöös on katsetatud kanepiluu kergbetooni soojuserijuhtivuse ja niiskuse sisalduse suhet. Katses kasutati kergbetooni kuiva materjali tihedusega 364 kg/m<sup>3</sup>. Tulemuseks saadi, et kuiva materjali soojuserijuhtivus oli 0,107 W/mK ning see tõusis väärtusele 0,134 W/mK kui selle veesisaldus oli 0,16 g/g. (Collet, Pretot, 2014)

Soojustusmaterjal peab olema ka heade heliisolatsiooni omadustega. Kuna kanepiluu kergbetoon on väikese tihedusega materjal on seda vaja krohvida heliisolatsiooni omaduste parandamiseks. Krohvimine vähendab avatud pooride hulka seina pinnal ning parandab seina heliisolatsioonivõimet. Ühe Inglismaal läbi viidud uurimustöö tulemused näitavad, et kanepiluu kergbetooni segud, mis sisaldavad hüdraulilisi lisandeid on halvema helisummutusvõimega. Paremad heli isoleerivad omadused on saadud segudega, mis sisaldavad lisanditena putsolaane. Tsemendiga segud näitasid halvemaid heliisolatsiooni omadusi. Selle uurimustöö autorid mainivad, et segus olevate hüdrauliliste lisandite olemasolu ja heliisolatsiooni võime vahelise seose kinnitamiseks on vaja läbi viia täiendavaid uurimusi. (Kinnane jt, 2016)

Keskkonnakaitsjate seisukohast võib tsemendi kasutamine looduslikus materjalis tunduda ebasobiv. Kuid tuleb arvestada sellega, et tänapäeval toodetakse tsementi kasutades üha enam lisandina taaskasutatavaid materjale nagu elektri jaamade tuhk ja räbu. Nii lubja kui ka tsemendi tööstuses on tehtud suuri pingutusi, et vähendada materjali tootmisele kuluvat energiat ning eralduvaid kahjulikke aineid. Samuti kasutades kanepi taimest saadud tooraineid võib lisada, et



see taim oma elutsükli jooksul seob piisavalt palju süsihappegaasi, et mingil määral korvata tsemendi kasutamisest tulenevat keskkonnamõju. (Bevan, Woolley, 2008)

### 1.3.3. Kanepiplaat

Kanepi taime vartest on võimalik valmistada soojustusplaati, mis on omadustelt sarnane pillirooplaadiga (joonis 1.7). Kanepi varred pressitakse kokku ja seotakse tsinktraadiga või kanepinööri. Valmistatud plaat sobib hästi loodusliku krohvi alusplaadiks. Kasutades mittesüttivaid krohve on võimalik tagada materjali tulepüsivus. Plaadid sobivad kasutamiseks puitmajades seest poolt soojustamiseks, et kaitsta materjali liigniiskuse eest. (Anslan, 2015)



**Joonis 1.7.** Kanepi- ja pilliroo vartest plaadid: vasakul – kanepiplaat; paremal – pillirooplaat (Anslan, 2015)

Plaadi käsitsi valmistamisel pannakse kanepi varred spetsiaalse puidust sidumisraami vahele, millega saab valmistada 50 mm paksust plaati. Varred pannakse restide vahele horisontaalselt. Seejärel need pingutatakse ja fikseeritakse traadiga, et plaat saaks võimalikult tihe ja hoiaks kuju. Lõpuks lõigatakse plaat vajalikku mõõtu. (Anslan, 2015)

#### 1.3.4. Kanepiluu

Kanepi varrest kiu eemaldamise protsessi käigus tekib jääkproduktina kanepiluu. Iga kanepikiu kilogrammi tootmisel tekib umbes 1,7 kg kanepiluud (Carus jt, 2013). Seda materjali saab ehituses kasutada eespool kirjeldatud kergbetooni valmistamisel, kanepiluu ehitusplaatide tootmisel, krohvisegudes (soojapidavuse parandamiseks) ning ka täiesti lahtiselt puistena. Kanepiluu on taime varre sisemine osa, mis on oma koostiselt sarnane puiduga (tabel 1.5).

**Tabel 1.5.** Kanepiluu ja puidu koostis kaalu protsendina (Chabbert, 2013. Kask, 2014)

Materjal	Tselluloos	Hemitselluloos	Pektiin	Ligniin	Vaha	Proteiin
Kanepiluu	44%	18%	4%	28%	1%	3%
Puit	40-50%	20-30%	-	20-30%	-	-

Kanepiluud saab kasutada puistematerjalina vahelagedes samamoodi nagu näiteks saepuru. Arvestada tuleks sellega, et aja jooksul toimub puistematerjali vajumine ning soojustuse tihedus suureneb. Tiheduse suurenemine toob kaasa ka soojusjuhtivuse suurenemise. Kanepiluud on võimalik kasutada ka põrandates ja seintes kuid seal tekkivad veel suuremad probleemid materjali vajumisega. Samuti on seinte puhul raske täita lae ja akende aluseid piirkondi, kus võivad sisse jääda tühimikud. Vajumine on kõigi puistematerjalide puhul probleemiks ning sellepärast kasutatakse selliseid materjale pigem horisontaalsete konstruktsioonide (laed, põrandad) soojustamiseks. Pealt lahtiste lagede puhul on alati võimalus suurte vajumite või tühimike korral puistematerjali lisada. Kanepiluu vajumist on põgusalt uuritud käesoleva magistritöö kolmandas peatükis ning on välja toodud katsetest tulenevad järeldused, kuidas oleks kanepiluud mõistlikum konstruktsioonis kasutada.

Põrandate puhul võib kanepiluule kahju tekitada niiskus kui materjali ei ole selle eest korralikult kaitstud. Kui kergbetoonis kasutamiseks ei ole vaja kanepiluud selle kaitsmiseks keemiliselt töödelda, siis lahtiselt kasutamisel võib see vajadus tekkida. Näiteks võib töötlemata kanepiluule kahju tekitada tuli ja erinevad bioloogilised kahjurid. Samuti võib ohuks olla niiskus, kuna kanepiluu on võimeline imama niiskust nelja kordselt enda kuivmassist (Carus jt, 2013). Tabelis 1.6 on võrreldud kanepiluu ja erinevate soojustusmaterjalide ehitusfüüsikalisi omadusi, mis on määratud Eesti Maaülikoolis.



**Tabel 1.6.** Materjalide füüsikalised omadused (Miljan M-J., Miljan J., 2012)

Materjal	Tihedus $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Veesisaldus w [%]	Soojuseriijuhtivus $\lambda$ [W/mK]
EPS	17	-	0,038
Isover puistevill	50	0,6	0,039
Isover puistevill	30	0,3	0,065
Tselluvill	50	9,1	0,044
Tselluvill	30	7,6	0,045
Höövlilaast	69	8,7	0,047
Linaluu	109	8,4	0,050
Kanepiluu	94	8,2	0,053
Kanepihake	64	8,5	0,056
Saepuru	197	9,5	0,062
Pilliroomatt	118,6	5,4	0,070
Pilliroomultš	76	7,8	0,074
Kanepikiud	38	7,2	0,079

Tabelist 1.6 on näha, et kanepiluu soojuseriijuhtivus on väiksem kui saepurul, aga suurem kui tööstuslikel villadel. Võrreldes linaluuga või höövlilaastuga on soojuseriijuhtivus enam-vähem sama. Seega kanepiluud on mõistlik kasutada alternatiivse soojustusena.

#### **1.4. Uurimustöö kanepiluu kergbetooni soojus-niiskus režiimi kohta katsemajas**

Uurimustöö viidi läbi Inglismaal Bath'i ülikoolis (*University of Bath*). Töö autoriteks on Andy Shea, Mike Lawrence ja Pete Walker. See põhineb laboratoorsetel katsetel ning katsemajast saadud mõõtmistulemuste analüüsil. Katsemaja ehitati ülikooli lähedale ja sellele pandi nimeks Hempod. Katsemaja (joonis 1.8) ehitust alustati 2010. aasta juunis ning ehitamiseks kulus 10 päeva. Seintel lasti kuivada 8 nädalat enne välimisi krohvitoide. Sügiseperioodi jooksul lasti hoonel välja kuivada. Selle aja jooksul jälgiti seintes oleva soojustusmaterjali niiskuse sisaldust ning 2011. aasta jaanuaris niiskusetasemed seintes saavutasid väliskeskkonnaga tasakaaluoleku. 2011. aasta jaanuaris hakati fikseerima mõõtmistulemusi. Töö eesmärgiks on anda ülevaade kanepiluu kergbetooni omadustest, katsemaja ehitamisest ning mõõtmistulemustest ja nende analüüsist. (Shea jt, 2012)



**Joonis 1.8.** Katsemaja Hempod Inglismaal (Shea jt, 2012)

Uurimustöö tegemise vajadust on autorid põhjendanud ehitussektori poolt keskkonda emiteeritava suure hulga CO<sub>2</sub> koguse tõttu. Näiteks on välja toodud, et aastal 2008 oli Inglismaal CO<sub>2</sub> emissioon 525 miljonit tonni. Ning sellest kogusest 298,4 miljonit tonni oli ehitussektori osa. Looduslike materjalide sh kanepiluu kasutamine ehituses on peamiselt huviorbiidis CO<sub>2</sub> emissioonide vähendamise pärast. (Shea jt, 2012)

Ettevõtte nimega Lime Technology Ltd on teinud arvutusi, mis näitavad kanepiluuga kergbetooni keskkonnamõju. Tulemuseks on saadud, et 1 m<sup>3</sup> seina segu sisaldab 110 kg kanepiluud, mis kasvamise käigus seob 202 kg CO<sub>2</sub> ning 220 kg sideainete segu, mille tootmine paiskab õhku 94 kg CO<sub>2</sub>. Seega nende arvutuste põhjal 1 m<sup>3</sup> seina segu seob 108 kg CO<sub>2</sub> tekitades keskkonnale positiivset mõju. (Bevan & Woolley, 2008)

Samuti tuuakse välja materjali kasutamise teisi positiivseid külgi nagu ressursi taastuvus, kanepi kasvatamise lihtsus, sisekliima reguleerimine, materjali väike tihedus, madal soojuserijuhtivus jne. Kergbetooni tihedus, soojuserijuhtivus ja survetugevus sõltuvad kanepiluu ja sideaine proportsioonidest segus (Shea jt, 2012). Kasutades tabelit 1.7 valiti katsemaja seinte soojustamiseks seina segu tihedusega 275 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabel 1.7.** Kanepiluu kergbetooni karakteristikud (Shea jt, 2012)

Kasutusviis	Kanepiluu : sideaine* masside vahekord	Tihedus $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Survetugevus [N/mm <sup>2</sup> ]	Soojuserihtivus $\lambda$ [W/mK]
Katus	1 : 1	220	0,05	0,06
Sein	1 : 1,5	275	0,11	0,06 - 0,09
Sein	1 : 2	330	0,22	0,09 - 0,115
Sein (tihendatud)	1 : 2	440	0,35	0,115
Põrand	1 : 3	500	0,8	0,13
Põrand	1 : 4	600	1,5	0,14
Plokid	1 : 4	600 - 1000	2 - 6	0,14 - 0,27

Märkus. \*Sideaineks on Tradical HB, mis koosneb kustutatud lubjast, tsemendist ja muudest mineraalsetest ja puitsolaani lisanditest.

Hoone põrand kaeti puitlaastplaatidega, mille all oli 200 mm paksune suletud pooridega soojustusmaterjal ( $\lambda=0,023$  W/mK). Uurimustöös ei ole täpsustatud, mida mõeldakse suletud pooridega soojustuse all. Kuid arvestades antud soojuserihtivust, võib selleks olla näiteks suletud pooridega polüuretaanist (PUR) soojustusmaterjal (EIEL, 2017). Põrandapinna suurus oli umbes 27 m<sup>2</sup>. Lagi soojustati samuti suletud pooridega 200 mm paksuse isolatsiooniga, mis kaeti 9 mm kipsplaadiga. Nii lae kui ka põranda arvutuslik soojuslähivus oli  $U=0,14$  W/m<sup>2</sup>K. Paigaldatud uks ja aknad olid puidust raamiga, kolmekordse klaasiga ja argooni täitega klaaside vahel. Uks paigaldati hoone lõunapoolsele küljele ja selle  $U$ -väärtus oli 0,79 W/m<sup>2</sup>K. Põhjapoolsete akende  $U=0,97$  W/m<sup>2</sup>K ja lõunapoolsele akende  $U=1,05$  W/m<sup>2</sup>K. Lae ja seina ning seina ja põranda liitekohad suleti auru läbilaskva teibiga. Sama teibiga kaeti ka akende/ukse ja seina ühenduskohad. Õhutiheduse saavutamiseks ja soojustuse kaitseks veeauru eest paigaldati lae kipsplaadi peale Itello aurutõkkemembraan, mis ühendati seinaga. Seinte puitkarkass tehti 75 x 50 mm prussidest, 600 mm sammuga. Karkass oli hoone sisepinnal ja seestpoolt kaeti seinad 9 mm paksuste magneesium-silikaat plaatidega. Sein täideti 200 mm paksuse kanepiluu kergbetooniga kasutades ajutisi raketisi (joonis 1.9). Sein täideti lae soojustatud pinnast kõrgemale. Kergbetoonis oli 1 osa Tradical HF kanepiluu ja 1,5 osa Tradical HB sideainet (koostisosade vahekord massi järgi). Paigaldamiselt tihendati soojustust minimaalselt, ainult nii palju et saavutada materjali soovitud tihedus 275 kg/m<sup>3</sup>. (Shea jt, 2012)

Arvutuste põhjal saadi seina soojustakistuseks  $R=3,20$  m<sup>2</sup>K/W, mis vastab soojusjuhtivusarvule  $U=0,31$  W/m<sup>2</sup>K. Kasutades arvutatud väärtusi ja mõõdetud katsemaja

piirete pindalasid tekitati arvutustabeli põhine mudel, mida võrreldi tehtud testide tulemustega. Mudelis arvestati ka soojuskadusid infiltratsiooni ja külmasildade tõttu. (Shea jt, 2012)



**Joonis 1.9.** Katsemaja seina kergbetooniga täitmine ja andurite paigaldus (Shea jt, 2012)

Selleks, et teada saada hoone soojuskaod piirete õhuläbilaskvuse tõttu mõõdeti õhuvahetuskordsust valmis katsemajale. Tulemuseks saadi 50 Pa rõhuerinevuse juures 0,55. See tähendab, et 1 h jooksul vahetub ruumis õhk 0,55 korda. Passiivmaja nõutele vastamiseks peab õhuvahetuskordsus vastama nõudele  $\leq 0,6$ . (Shea jt, 2012)

Kütmise katsel oli ruumi temperatuur  $24^{\circ}\text{C}$ . Enne mõõtmisi köeti hoonet kaks nädalat. Kütmiseks kasutati elektrilist soojapuhurit ja ventilaatorit, mis ühendati termostaadiga, et tagada stabiilne, tavalisest toatemperatuurist kõrgem temperatuur. Seitsme päeva andmetel arvutati soojuskadude koefitsient. Päikese mõju välistamiseks mõõdeti päikese kiirgusest tulenevat lisasoojust. Soojuskaod koefitsiendi arvutamisel arvestati soojuskadusid läbi kõigi hoone piirete ning tulemuseks saadi 36,7 W/K. Mudeli järgi saadi soojuskaod koefitsiendiks stabiilses olukorras 35,6 W/K, ehk mudel ennustas reaalseid olusid 3 % täpsusega. Mudeli järgi olid seitsme päeva soojuskaod protsentuaalselt järgmised: 1) 47,1 % kanepist ehitatud elemendid, 2) 34,3 % mitte kanepist ehitatud elemendid, 3) 13,5 % külmasildade tõttu ja 4) 5,1 % infiltratsiooni tõttu. (Shea jt, 2012)

Kütmise testi järel viidi läbi termograafiline uuring, et hinnata külmasildasid avatäidete ümber ja hoones olevates ühenduskohtades. Selgus, et geomeetrilised külmasillad eksisteerisid ja suurendasid soojuskadusid, mida ei arvestatud U-väärtuse arvutamisel. Selle tulemusena oli piirde sisepinna temperatuur madalam ja suurenes kondenseerumise ja hallituse kasvu oht. Ohu suuruse hindamiseks leiti termograafilise uuringu käigus kõige külmem ühenduskoht hoones, milleks oli lääne- ja põhjapoolse seina liitekoht põrandaga. Selle põhjal arvutati temperatuurifaktor  $f_{Rsi}=0,81$ . See tegur peab olema suurem kui ette antud kriitiline temperatuuri faktor, et vältida veeauru kondenseerumise ja hallituse tekke ohtu. Kriitiliseks temperatuuri faktoriks on  $f_{CRsi}=0,75$  eluruumide puhul, büroorumide puhul  $f_{CRsi}=0,5$  ja spordiruumide ning köökide/sööklate puhul  $f_{CRsi}=0,8$ . Seega algselt kahtlustatud hallituse ja veeauru kondenseerumise ohtu ei ole. (Shea jt, 2012)

Mai kuu jooksul mõõdeti anduritega õhuniiskust ja temperatuuri hoones sees ja väljas. Võrreldes ilmastiku muutustega väljas olid katsemaja sisesed muutused palju väiksemad. Mai kuu jooksul kogutud andmed näitavad, et keskmiselt muutus välistemperatuur  $6,5^{\circ}\text{C}$  ja sisemine temperatuuride muutus oli keskmiselt  $0,9^{\circ}\text{C}$ . (Shea jt, 2012)

Laboratoorses tingimustes uuriti 300 mm paksust kanepiluu kergbetoonist paneeli. Enne testi algust hoiti paneeli 12 kuud siseruumis. Seejärel hoiti paneeli 30 päeva kontrollitud keskkonnas ( $20^{\circ}\text{C}$  ja 60% RH). Mõlemad paneeli pooled olid katse ajaks kontrollitud laboratoorses tingimustes. Üks pool vastas siseruumi tingimustele ja teisel poolel tekitati kliimakambrit kasutades järsk temperatuuri langus  $20^{\circ}\text{C}$  pealt  $0^{\circ}\text{C}$  peale. Suhtelise niiskuse ja temperatuuri mõõtmise andurid olid paigaldatud paneeli sisse erinevatele sügavustele. Kulub umbes 240 h, et paneel saavutaks stabiilse oleku, mis oli oodatust pikem. Katse tulemusi võrreldi arvutisimulatsiooniga tarkvaras WUFI Pro 5. Simulatsioonis arvestati ainult temperatuuri mõjuga ning niiskuse mõju ignoreeriti. Mudeli järgi kulub 72 h, et paneel saavutaks stabiilse oleku. See tähendab, et kanepiluu kergbetooni soojustusomaduste hindamiseks ei piisa ainult U väärtusega arvestamisest. Selleks, et teha õigeid järeldusi kergbetooni soojustusomaduste kohta reaalses konstruktsioonis tuleb arvestada paljude muutujatega ja et ilmastiku tingimuste mõjul hoone konstruktsioon enamasti ei saavutagi stabiilset olekut. Samasuguse järelduseni jõudsid ka Arnaud Evrard ja A. De Herde, kes olid samuti modelleerinud WUFI tarkvaraga sama materjali. (Shea jt, 2012)

## 2. SURVETUGEVUSE KATSED

### 2.1. Katsekehade valmistamine

Kanepiluu kergbetooni omaduste uurimiseks valmistati Eesti Maaülikoolis kaks erinevat segu (MK4 ja MK5). Võrdlemiseks katsetati ka katsekehi, mis ei ole valmistatud magistritöö autori poolt. Kolm erinevat segu (MK1, MK2, MK3) on valmistanud Urmas Terras, kes tegeleb looduslikest materjalidest kergsegude väljatöötamise ja valmistamisega. Tema soovil katsekehade täpset koostisosade vahetorda magistritöös ei avaldata. MK4 ja MK5 segudest valmistati kolm katsekeha nii soojusvoo, adsorptsiooni kui ka survetugevuse katseteks. Katsekehade koostised on esitatud tabelis 2.1. Segude MK4 ja MK5 koostisosade vahetord on esitatud kuivaine mahuprotsendina (ei sisalda vett). Tabelis 2.2 on Eesti Maaülikoolis valmistatud segudele kulunud materjalide täpsed kogused.

**Tabel 2.1.** Kergbetooni segude koostised (MK4 ja MK5 juures on kuivaine mahuprotsendid)

Tähistus	Segu valmimise kuupäev	Koostisosad
MK1	23.11.2016	kanepiluu, peensaepuru, hõõvlipuru, tsement, kustutatud lubi
MK2	30.11.2016	kanepiluu, peensaepuru, hõõvlipuru, tsement, kustutatud lubi, tugevdav lisand
MK3	8.12.2016	peensaepuru, kuusepaberipuu hake, tsement, kustutatud lubi, tugevdav lisand
MK4	26.01.2017	kanepiluu 80% , kustutatud lubi 14% , tsement 6%
MK5	29.01.2017	kanepiluu 80% , savi 20%

Märkus. MK1 ja MK2 puhul on erinevus tugevdavas lisandis ning samuti on erinevad ka teiste koostisosade vahetordad. Nende kahe segu puhul on sideainena kasutatud suuremas osas tsementi.

**Tabel 2.2.** MK4 ja MK5 kergbetooni segude valmistamiseks kulunud materjal massi järgi. Sulgudes on kuivaine massiprotsendid

Tähistus	Kanepiluu [g]	Savi [g]	Kustutatud lubi [g]	Tsement [g]	Vesi [l]
MK4	<b>6092</b> (35%)	-	<b>5873</b> (33%)	<b>5557,8</b> (32%)	<b>15,6</b>
MK5	<b>5835</b> (27%)	<b>15563</b> (73%)	-	-	<b>12,8</b>

Tabelis 2.2 esitatud katsekehade valmistamiseks tuli ära sõeluda kanepiluu, kuna katseteks saadud materjal sisaldas kanepikiudu. Segus MK5 kasutati Remas Grupi poolt pakutavat jahvatatud punast savi. Segus MK4 kasutati NOVIPro portlandtsementi (CEM I 42,5 N) ja kustutatud lupja CL 80-S. Segu valmistati vertikaalses labadega segumasinas Raimondi IPERBET. Kuna kanepiluu kergbetooni segu ei ole vedel vaid peab olema paks ja muldniiske, siis selle segumasinaga pidi mõlemat segu tüüpi segama neli korda, sest suurema kogusega hakkas masin segu anumast välja ajama. Tänu sellele, et korraga sai segada väikest kogust segu oli võimalik paremini jälgida valmiva segu ühtlust. Kõigi materjalide kogused olid enne segamist välja arvestatud ja doseerimiseks valmis pandud. Esialgu valmistati sideaine koos veega ning seejärel lisati järk-järgult kuiva kanepiluud ning vett. Kui ühtlane segu oli valmis, pandi segu vormidesse, mis olid õlitatud toiduõliga. Kõik vormid olid valmistatud veekindlast vineerist ning lahtikäivate külgedega. Vormid täideti kolmes kihis ja igat kihti tihendati kerge tampimisega. Tihendamiseks kasutati puidust prussi ristlõikega 50x50 mm.

## **2.2. Katsetametoodika ja kasutatavad seadmed**

Survetugevuse katseteks valmistatud katsekehade mõõtmed olid 150x150x150 mm. Enne katset kuubikud mõõdeti ja kaaluti, et määrata materjalide tihedused. Katsekehade mõõtmete määramiseks kasutati digitaalsed nihkkaliiberit, mis mõõdab sajandiku täpsusega. Massi määramiseks kasutati digitaalset kaalu Kern 572 ( $d=0,1\text{g}$ ), millega on maksimaalselt võimalik kaaluda kuni 12 100 g raskust. Katsekehade kuivatamiseks ja niiskuse sisalduse määramiseks kasutati kuivatuskappi Memmert. Selleks, et saavutada ühtlasem survepind lihviti katsekehade üks külge lihvimismasinaga. Survepinnaks võeti see külge, kust poolt segu vormidesse pandi. Pärast lihvimist mõõdeti survepinnad uuesti üle, et arvutada täpsemad pindalad. Survekatsed viidi läbi 18.04.2017.

**Survekatsemasin 3HM ИСУ-10 (joonis 2.1).** Kanepiluu kergbetooni survetugevuse määramisel taheti saada täpsemaid tulemusi ning selle tõttu alustati pressiga, millel on kõige väiksem skaala jaotis. Pressi maksimaalne survejõud on 10 tonni ja masinal on kaks skaalat 163,5 N ja 327 N. Esialgu kasutati väiksemat skaalat ning ühe katsekeha puhul tuli kasutada suuremat.



**Survekatsemasin ЗИМ II-50 (joonis 2.1).** Kui selgus, et 10 tonnine press ei suuda purustada MK3 katsekehasid võeti kasutusele võimsam seade. Selle pressi maksimaalne survejõud on 50 tonni ning masinal on ainult üks skaala, millelt saab kohe õige näidu.



**Joonis 2.1.** Survekatsemasinad: vasakul – ЗИМ ПСУ-10; paremal – ЗИМ II-50

Katsekehade purustamisel tuli välja, et nende katsekehade puhul ei toimu samasugust habrast purunemist nagu tavalise betooniga ning survetugevuse määramiseks tuleb kasutada teistsugust meetodikat. Vajalikule meetodikale viitas oma magistritöös Henri Liivlaid, kes kirjutas lõputöö teemal „Täitematerjalid kergbetooni tootmiseks“. Tema kasutas oma katsetes standardi EVS-EN 826:2013 vanemat versiooni, kus on räägitud soojustusmaterjalide survepinge määramisest 10% deformatsioonil.

**Survekatsemasin ЗИМ II-125 (joonis 2.2).** Selleks, et määrata ülejäänud katsekehade survetugevus 10% deformatsioonil võeti kasutusele press ЗИМ II-125, mis on varustatud siirde- ja rõhuanduriga (joonis 2.3). Andurid on ühendatud arvutiga ning arvutiprogrammist on võimalik näha katsekehale rakendatavat jõudu ning toimunud siiret. Arvutist on näha ka surve-deformatsiooni graafikut, mille andmed salvestatakse Microsoft Exceli failina ning nende andmetega on hiljem võimalik koostada sama graafik. Pressi maksimaalne jõud on 125 tonni.



**Joonis 2.2.** Survekatsemasin ЗИМ II-125



**Joonis 2.3.** ЗИМ II-125 küljes olev siirde andur

Survetugevuse katsete läbiviimisel kasutati standardeid EVS-EN 12390-3:2009, EVS-EN 1354:2005 ja EVS-EN 826:2013. Kui katsekehad olid ettevalmistatud ja survepinnad ära mõõdetud asetati need surveplaadile. Koormamisel rakendati ühtlast koormamiskiirust. Katsekehade survetugevuseks registreeriti jõud, mis mõjus 10% deformatsiooni korral. Katsekehade puhul, mis on mõõtmetega 150x150x150 mm 10% deformatsiooniks loeti seda, kui katsekeha oli 15 mm võrra kokku pressitud. Kui koormamise ajal esines maksimaalne jõud enne 10% deformatsiooni fikseeriti see katsekeha survetugevuseks. Presside puhul, mis ei olnud varustatud siirdeanduriga võeti survetugevuseks näit umbkaudu katsekeha 10% deformatsioonil. Saadud andmetega arvutati katsekehade survetugevused.

Katsekehade survetugevus arvutati valemiga 2.1. (EVS-EN 12390-3:2009)

$$f_c = \frac{F}{A}, \quad (2.1)$$

kus,  $f_c$  — survetugevus [MPa ; N/mm<sup>2</sup>];

$F$  — suurim koormus [N];

$A$  — katsekeha ristlõike pind, millele survejõud mõjub [mm<sup>2</sup>].

Katsekehade näivtihedus on leitud valemiga 2.2. (EVS-EN 1602:2013)

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2.2)$$

kus,  $m$  — katsekeha mass [kg];  
 $V$  — katsekeha ruumala [m<sup>3</sup>].

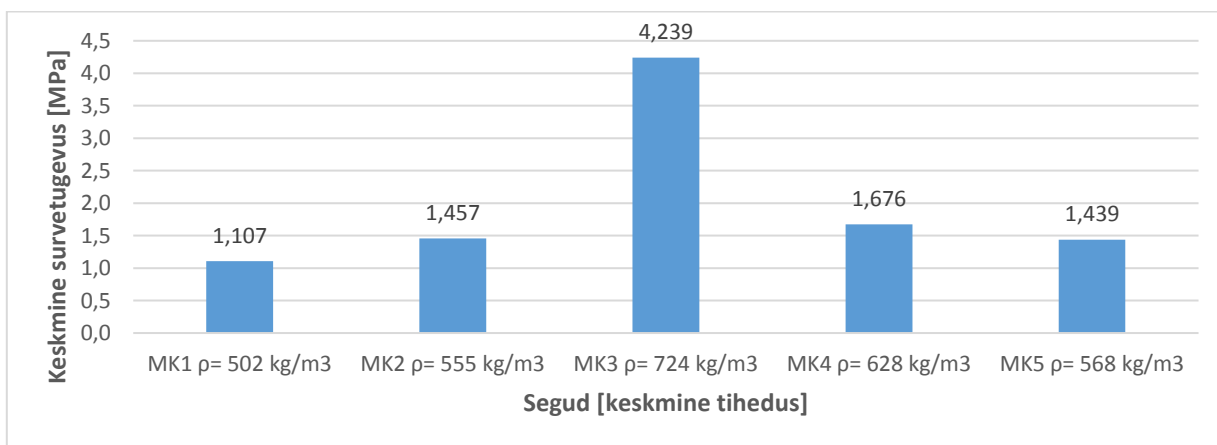
Katsekehade niiskuse sisaldused arvutati valemiga 2.3. (Adamson, Lindmaa, 1977)

$$w_k = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

kus,  $w_k$  — materjali kaaluline niiskus [%];  
 $P_1$  — materjali kaal enne kuivatamist [kg];  
 $P_2$  — kuiva materjali kaal [kg].

## 2.3. Katse tulemused

Eesti Maaülikoolis valmistatud katsekehasid (MK4 ja MK5) oli mõlemast segu tüübist kolm. MK1 ja MK2 oli mõlemat kuus katsekeha ning MK3 oli 5 tükki. Kõigi katsekehade puhul oli jõud 10% deformatsioonil vahemikus 22...100 kN ning keskmine oli 43,7 kN. Uuritud katsekehade kõik määratud näitajad ja purunemispildid on välja toodud lisas 1. Kõik purunemispildid ei ole tehtud 10% deformatsiooni korral. Paljusid katsekehi koormati ka pärast näidu fikseerimist. Katsekehade, mis on purustatud survekatsemasinaga ЗИМ II-125, surve-deformatsiooni graafikud on samuti lisas 1. Joonisel 2.4 on segude keskmised tihedused ja survetugevused ning nende vaheline seos.



**Joonis 2.4.** Survetugevuse sõltuvus segu tüübist. Katsekeha tähise järel on kuivatamata materjali tihedus. Segude koostised on toodud tabelis 2.1.

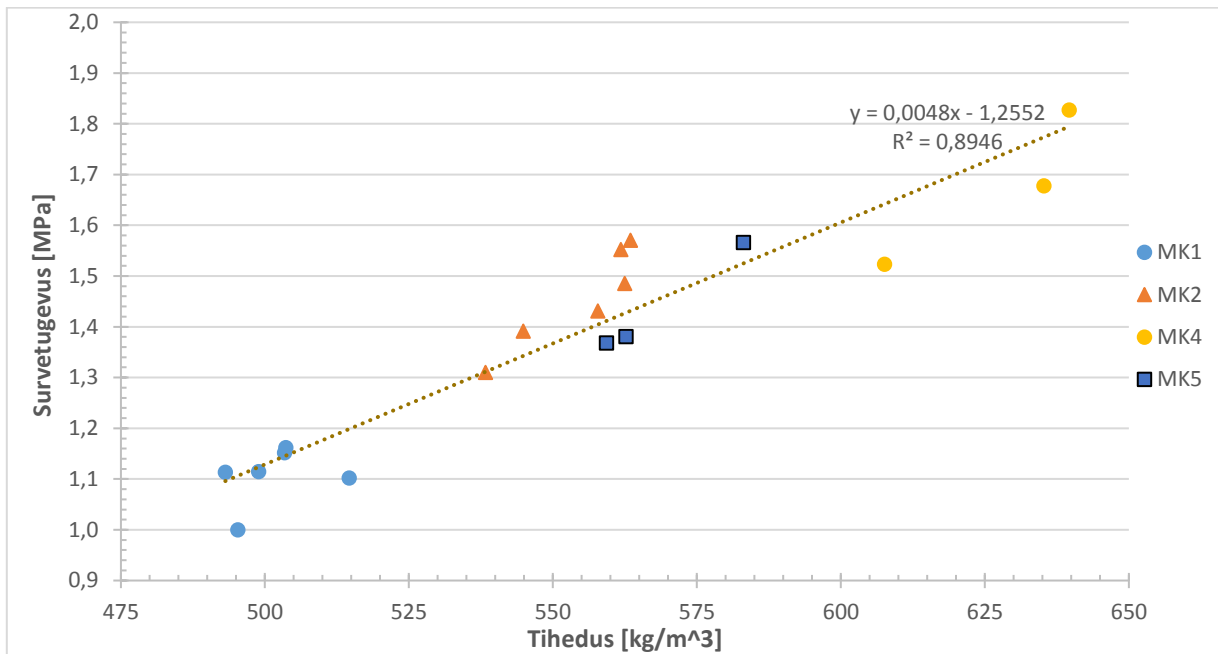
Graafikult on näha, et katsekehad MK3 on palju suurema survetugevusega kui ülejäänud katsekehad. See tuleneb sellest, et nende katsekehade tihedus on tunduvalt suurem. Samuti annab tugevust juurde ka kuusepaberipuu hakke ja tugevdava lisandi sisaldus segus. Oluline on mainida, et MK3 katsekehade survepinnad sisaldasid isegi pärast lihvimist mitmeid tühimikke ja murenenud nurkasid ning nende survepinna ühtlus jäi vahemikku 89...97%, mis on määratud visuaalse hindamise teel. Sama olukord oli ka osade MK1 ja MK2 katsekehade puhul kuid seal oli survepinna ühtluse vahemik 97...98%.

Kõik segud peale MK3 sisaldasid kanepiluud. Kanepiga segude keskmised tihedused ja survetugevused on suhteliselt sarnased. Kanepiga kergbetoon eraldi vaadates osutusid keskmiselt kõige tugevamaks katsekehad MK4, mis sisaldasid kõige rohkem kanepiluud (80% kuiva materjali massist). Sama palju kanepiluud oli ka segus MK5 kuid need katsekehad oli valmistatud ainult savist sideainega ning nende tihedus tuli väiksem. MK2 ja MK1 segud sisaldasid samasid koostisosi kuigi natukene erinevas vahekorras ning MK2 koostistes oli ka tugevdav lisand, millest võis tuleneda ka märgatavalt suurem survetugevus. MK1 katsekehad osutusid kõigist katsekehadest kõige nõrgemaks. Jooniselt 2.4 on näha, et materjali tiheduse ja survetugevuse vahel on seos.

MK4 ja MK5 segude valmistamisel oli eesmärgiks saada heade soojuslike omadustega katsekehi seega püüti valmistada materjali, mille tihedus on alla  $500 \text{ kg/m}^3$ . Jooniselt 2.4 on näha, et soovitud segude mahumassi ei saavutatud ning materjal osutus tihedamaks ja tugevamaks kui ta oleks pidanud olema. See võis tuleneda liigsest materjali tihendamisest. Väiksema tihedusega materjali saamiseks on vaja tihendada minimaalselt, ainult nii palju, et segu oleks vormis ühtlaselt jaotunud. Minimaalset tihendamist on kasutatud ka esimeses peatükis kirjeldatud katsemaja Hempod ehitamisel. Saadud katsekehad on tiheduse järgi võrreldavad põrandate täitmiseks kasutatava seguga. Käesoleva magistritöö esimeses peatükis asuvas tabelis 1.7 ühe sellise segu tiheduseks on  $600 \text{ kg/m}^3$  ning selle survetugevuseks on 1,5 MPa. Nii MK4 kui ka MK5 segude näitajad on selle segu näitajatega samas suurusjärgus.

Kanepiluu kergbetoon on mõeldud hoone piirete soojusisolatsiooniks. Seega on väga oluline materjali madal tihedus. Selline materjal ei sobi kandvate konstruktsioonide ehitamiseks kuid sellega seinte, põrandate või lagede täitmine annab konstruktsioonile juurde stabiilsust ja jäikust. Seega on survetugevus samuti mingil määral oluline, eriti kasutades seda materjali

põrandate soojustamiseks. Joonisel 2.5 on võrreldud individuaalsete katsekehade survetugevusi ja tihedusi ning nende vahelist seost.



**Joonis 2.5.** Kanepiluu kergbetoonist katsekehade survetugevuse sõltuvus materjali tihedusest. Segude koostised on toodud tabelis 2.1.

Iga tähis joonisel 2.5 esindab ühe katsekeha tihedust ja survetugevust. Kuna MK3 katsekehad on teistest materjalidest palju suurema tiheduse ja survetugevusega jäeti need graafikult välja. Jooniselt 2.5 esitatud andmed kinnitavad väidet, et mida suurem on katsekeha tihedus seda suurem on selle survetugevus. Kõik kanepilood sisaldavad katsekehad on nii tiheduse kui ka tugevuse pooles suhteliselt samas suurusjärgus. Erandiks on MK4 katsekehad, mis on tunduvalt tihedamad kuid samas nende survetugevus ei ole märgatavalt suurem. Siinkohal võib oletada, et kanepiluu kergbetooni puhul ei pruugi suurem tihedus väga palju tugevust juurde anda. Kuid tõenäoliselt suurem tihedus suurendab märgatavalt materjali soojuserijuhtivust, mis on selle materjali puhul tunduvalt olulisem näitaja.

Katsekehade tiheduste hajuvus on arvatavasti põhjustatud ebaühtlase tihendamisega. Segu vormi tihendamist tehti käsitsi ning liiga kitsa prussiga. Ühtlasema tihedusega materjali saamiseks on tihendamise meetod sama oluline kui sideaine kogus segus.

### 3. KANEPILUU VAJUMISE KATSE

#### 3.1. Katsemetoodika

Kanepikiu tootmisest tekib kõrvaltootena kanepiluu. Sarnaselt saepurule, tselluvillale, linaluule ja teistele looduslikele puistematerjalidele saab ka lahtist kanepiluud kasutada hoonete soojustamiseks. Kuid puistematerjaliga kaasnevad mehaanilistest teguritest tingitud tihenemised, mis vähendavad materjali efektiivsust soojustusmaterjalina. Katse eesmärgiks oli uurida kanepiluu vajumisi tihendamata ja tihendatud kujul. Katse läbiviimisel kasutati standardit EVS-EN 15101-1:2013.

Vajumiste määramiseks viidi läbi kukumiskatsed, millega imiteeriti reaalsele konstruktsioonile mõjuvaid koormusi nagu näiteks tuul, uste ja akende sulgemine ning vibratsioonid. Katsetes kasutati OSB plaatidest valmistatud seinaelemente sisemõõtudega 200x400x1000 mm ning koputuslauda. Joonisel 3.1 olev koputuslaud tekitab käsivända pööramisel vertikaalse ja kindla kõrgusega kukkumise. Kukkumise kõrgust saab muuta ovaalse hooratta vahetamisega. Joonisel 3.1 nähtav hooratas on 45 mm amplituudiga.



**Joonis 3.1.** Vajumise katse vahendid: vasakul – katseseinaelement koputuslaual; paremal – koputuslaud



Standardi järgi peab katseseade tekitama kukkumist kõrguselt  $50 \pm 5$  mm, seega oli üks katseseeria teostatud standardile vastava amplituudiga. Esialgu katseseinad kaaluti tühjana, et hiljem teada saada sees oleva materjali mass. Kaalumiseks kasutati kaalu Kern FKB 36K0.1 ( $d=0,1$  g). Seejärel täideti seinaelement kanepiluuga ning peale paigutati OSB plaadist kaas. Enne katset kaaluti katsesein uuesti. Vertikaalse kukkumise tagajärjel seinaelemendis olev puistematerjal vajub allapoole ning koos materjaliga vajub ka selle peal olev kaas. Katseseina täitmise ajal üritati see ääreni täis saada kuid see ei ole alati nii täpselt võimalik. Selleks, et teada saada kanepiluu täpset vajumit mõõdeti enne katset kaane kaugus seinaelemendi ülemisest äärest ning sama mõõtmist korrati iga viie koputuse tagant. Mõõtmine teostati kaane neljas kindlaks määratud punktis (joonis 3.2) ning vajumiks loeti nelja mõõteväärtuse keskmist. Mõõtmiseks kasutati digitaalset nihkkaliiberit, mis mõõdab sajandiku millimeetri täpsusega.



**Joonis 3.2.** Katseseina elemendi pealtvaade pärast kukkumiskatset. X-1...X-4 on mõõtmispunktid

Katseseeriaid tehti kokku neli ja igas seerias katsetati nelja katseseina. Esimeses ja kolmandas katseseerias täideti katseseinad tihendamata kanepiluuga. Puiste kallati ühtlase kiirusega seinasse üritades täita kogu katseseina mahtu. Vajadusel siluti materjal kätega laiali kuid ei tihendatud. Teises ja neljandas katseseerias kanepiluu tihendati. Standard EVS-EN 15101-1:2013 näeb ette, et katsematerjali tihendamisel tuleb kasutada tootja poolt pakutud meetodit.



Kuna kanepiluu puhul ei ole tootja tihendamise meetodit ette määratud kasutati tihendamiseks Andres Metsmäe magistritöös kirjeldatud metoodikat (Metsmägi, 2008). Tihendamisel kallati puistematerjal katseseina sisse umbes 300 mm kihtidena ning siluti kätega laiali. Iga kihi peale paigutati OSB plaadist kaas ning sellele pandi peale 20 kg raskus (joonis 3.3). Seejärel katsesein tõsteti kolm korda üles ning lasti vabalt kukkuda umbes 15 cm kõrguselt. Sellist tihendamise protsessi tehti iga 300 mm kihi tagant (kokku kolm kihti).



**Joonis 3.3.** Esimese 300 mm kihi tihendamine. Raskus kokku 20 kg

Nii tihendamata kui ka tihendatud kanepiluud katsetati 12 mm ja 45 mm amplituudiste kukkumislaua hooratastega. Esimene ja teine katseseeria tehti 45 mm kukkumisega ning kolmas ja neljas 12 mm kukkumisega.

Kuna kokku tehti 16 katset, siis ei jätkunud piisavalt kanepiluud ega seinaelemente. Seega täideti kokku ainult nelja seinaelementi ja sama materjaliga, mis oli pärast iga kukkumiskatset sealt välja kallatud. Saadud andmetega arvutati kanepiluu vajumid, tihedused enne ja pärast kukkumiskatset ning koostati vajumise graafikud igale katseseinale ja igale katseseina mõõtmispunktile. Materjali veesisalduse määramiseks võeti kasutatud kanepiluust kolm proovi

ja kuivatati need kuivatukapis Memmert. Kanepiluu tihedused katseseinas arvutati valemiga 2.2 ja veesisaldus valemiga 2.3.

### 3.2. Katse tulemused

Kanepiluud katsetati kukkumislaua kahe erineva amplituudiga ning mõlema puhul tihendatud ja tihendamata kanepiluuga. Katse tulemustest selgub, et tihendamata kanepiluud paigaldada ei ole otstarbekas, kuna juba pärast 20 kukkumist olid katseseinas tekkinud vajumid vahemikus 15...20%. Tihendatud kanepiluu puhul esines mõõtmiste ajal vajumise asemel isegi materjali kerkimist. Vajumid jäid vahemikku 0,13...0,81%. Kanepiluu vajumise katsed on kokku võetud tabelis 3.4. Katsetatud kanepiluust võeti kolm proovi ja kuivatati need. Proovide niiskussisaldused olid 11,75%, 10,99% ja 10,70% ja nende keskmine on 11,15%. Standardi EVS-EN 15101-1:2013 järgi on vaja katseseinaga teha 20 kukkumist ja pärast seda paigutada need kliimakambrisse, kus seadistatakse temperatuuriks  $40\pm 5^{\circ}\text{C}$  ning suhtelise õhuniiskuse tasemeks  $90\pm 5\%$ . Kliimakambris mõõdetakse vajumit korra nädalas nii kaua kuni materjali paksuse muut jääb alla 1%. Selle katse raames mõõdeti vajumeid ainult kukkumise tagajärjel.

**Tabel 3.4.** Kanepiluu vajumise katsete kokkuvõte

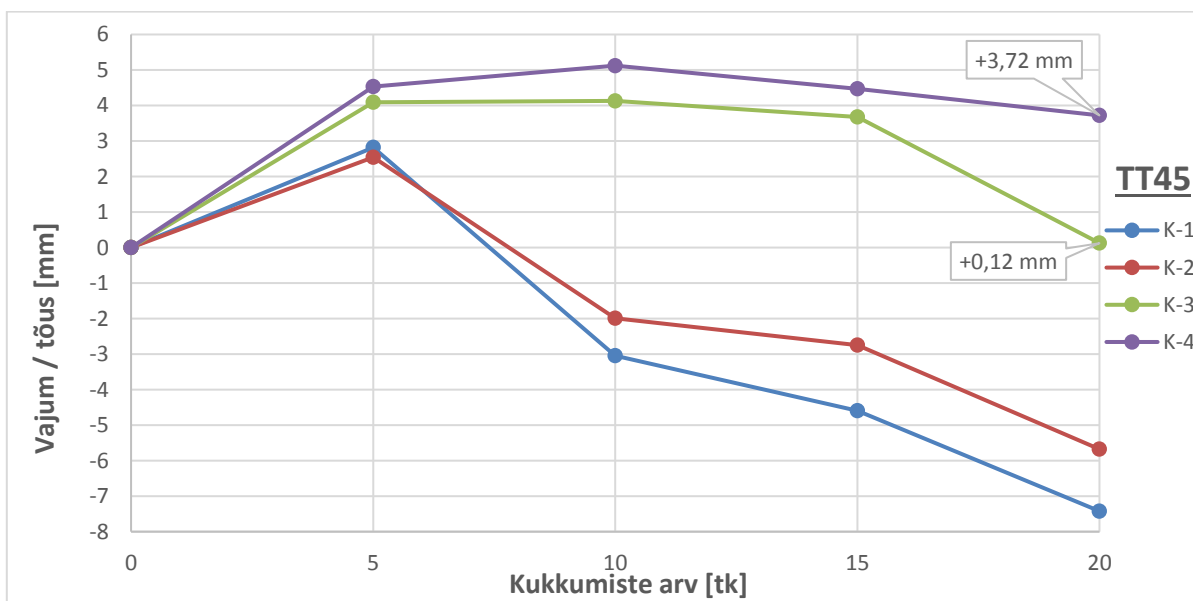
Katse-seeria	Katseseina tähis	Kanepiluu kaal [g]	Tihedus enne katset [ $\text{kg/m}^3$ ]	Tihedus pärast katset [ $\text{kg/m}^3$ ]	Tiheduse muutus [%]	Vajum - / tõus + [%]
TM 45 mm	K-1	7501,0	94,84	118,83	25,29%	-20,19%
	K-2	7910,6	99,31	117,07	17,88%	-15,17%
	K-3	7518,4	94,44	114,78	21,54%	-17,72%
	K-4	7429,1	93,73	115,80	23,55%	-19,06%
TT 45 mm	K-1	9368,2	127,55	128,59	0,82%	-0,81%
	K-2	9397,6	130,12	130,95	0,63%	-0,63%
	K-3	9284,6	126,71	126,69	<b>-0,01%</b>	<b>0,01%</b>
	K-4	9471,0	132,15	131,60	<b>-0,41%</b>	<b>0,42%</b>
TM 12 mm	K-1	7717,5	98,05	115,91	18,21%	-15,41%
	K-2	7719,4	98,82	115,90	17,29%	-14,74%
	K-3	7440,0	95,32	114,12	19,72%	-16,47%
	K-4	7638,6	96,53	114,28	18,39%	-15,53%
TT 12 mm	K-1	9512,0	134,76	134,74	<b>-0,02%</b>	<b>0,02%</b>
	K-2	9531,8	134,22	134,39	0,13%	-0,13%
	K-3	9441,2	131,51	132,00	0,37%	-0,37%
	K-4	9401,7	131,93	132,19	0,19%	-0,19%

Märkused: 1) TM – tihendamata kanepiluu; TT – tihendatud kanepiluu

2) 12 mm ja 45 mm näitavad katseseerias kasutatud kukkumise kõrgust

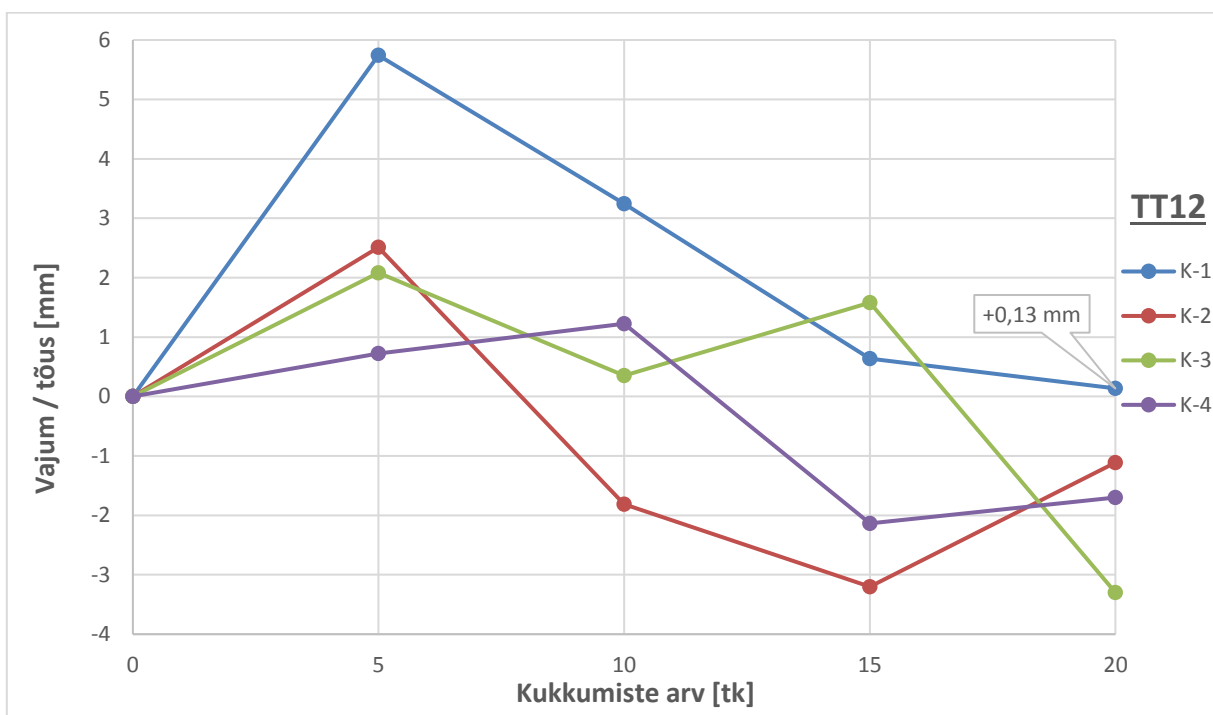
3) tumedas kirjas numbrid tähistavad materjali kerkimist katseseinas pärast 20 kukkumist

Tabelis olev tiheduse muutus näitab protsentides kui palju materjali tihedus suurenes või vähenes pärast vajumiskatset. Vajumi veerus on näidatud mitu protsenti materjal vajus või tõusis katseseinas kui sellega oli tehtud 20 kukkumist. Eraldi mõõtmispunktide vajumite graafikud on esitatud lisas 2. Tabelis on märgitud neli erinevat katseseeriat, kus igas seerias tehti neli katset. Kuna vajumite uurimisel kasutati sama kanepiluud ja samu katseseinu korduvalt on katseseina tähised igas seerias ühesugused. Tabelis 3.4 on esitatud tihedused enne kukkumiskatset ning pärast seda. Näha on, et mõlema tihendamata katseseeria puhul on katseseinaelemendis oleva kanepiluu tihedused on väga palju tõusnud, kuna toimunud on suured vajumid. Suurim materjali tihenemine oli 25,29% ja vähim 17,29%. Tihendatud kanepiluu puhul on näha, et vajumid ning materjali tiheduse muutused on praktiliselt olematud. Suurim tihenemine oli 0,82% ja vähim 0,13%. Kõigi tihendatud kanepiluuga katseseinte vajumid olid alla 1%. Standard EVS-EN 15101-1:2013 klassifitseerib selliseid vajumeid klassi SH 0 ehk mitte mõõdetav vajum (*no measurable settlement*  $\leq 1\%$ ). Kõigis tihendatud kanepiluuga katseseintes toimus katse ajal mingisugune materjali kerkimine kuid keskmiselt oli katse lõpuks materjal enamasti ikkagi tihenunud. Tabelis 3.4 kolm tumedas kirjas olevat tiheduse muutuse protsenti tähistavad materjali kerkimist katseseinas pärast 20 kukkumist. Joonisel 3.4 on näha tihendatud kanepiluuga katse tulemusi, kus kahes katsekehas (sildiga välja toodud) puistmaterjal katse lõpuks jäi natukene kõrgemale algsest tasemest.



**Joonis 3.4.** Tihendatud kanepiluuga ja 45 mm kõrguse kukkumisega katseseintes kanepiluu vajumid / tõusud

Joonisel 3.4 on näha kahte erinevat lõpptulemust sama katse puhul. Katseseinas K-1 olev kanepiluu oli katse lõpuks vajunud 5,68 mm ja K-2 oli vajum 7,42 mm. K-3 ja K-4 olev puistematerjal kerkis graafikul näidatud suuruste võrra. Kuna kanepiluu oli katseseintes hästi tihendatud tekkis esimese viie kukkumise tagajärjel kõigis katseseintes väike materjali kerkimine. Joonisel 3.5 on samuti esitatud tihendatud kanepiluuga vajumiskatsete tulemused kuid 12 mm kukkumiskõrgusega. Sellel graafikul on samuti üks katsesein, mille sees olev kanepiluu 20 kukkumise tagajärjel jäi algtasemest kõrgemale.

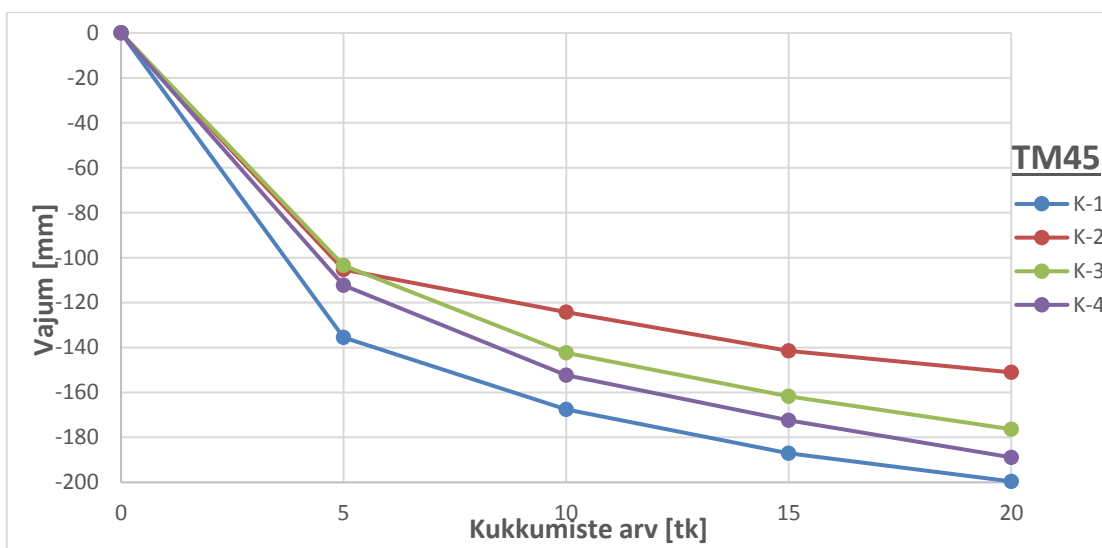


**Joonis 3.5.** Tihendatud kanepiluuga ja 12 mm kõrguse kukkumisega katseseintes kanepiluu vajumid / tõusud

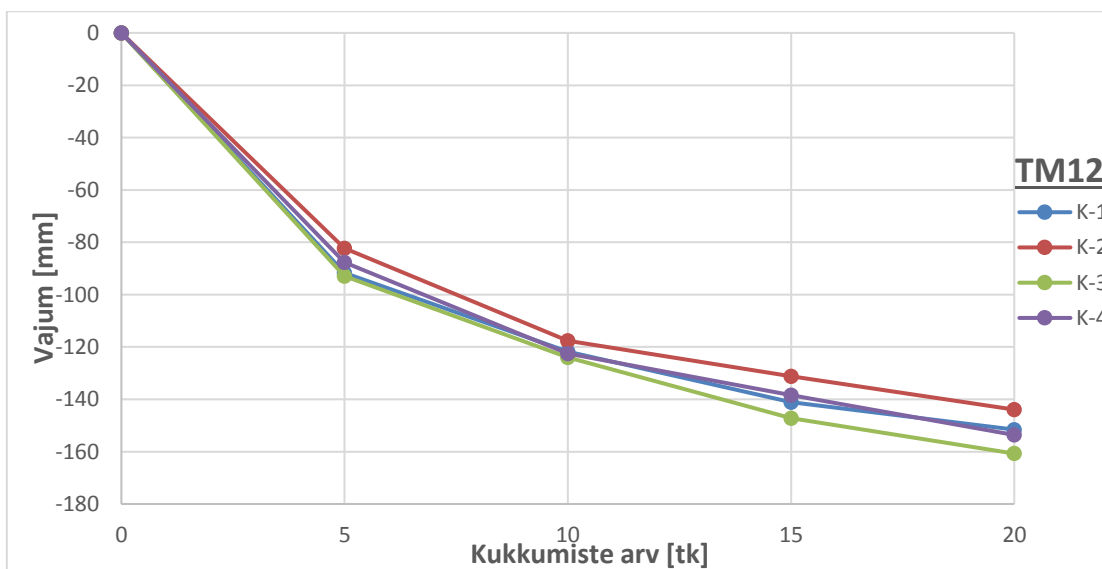
Jooniselt 3.5 on näha sarnast nähtust esimese viie kukkumise tagajärjel, kus kõigis katseseintes olev kanepiluu kerkis. Joonisel 3.4 ja 3.5 esitatud andmete põhjal saab väita, et tihendatud kanepiluu on vajumise suhtes vastupidav.

Katsetades vajumisi tihendamata kanepiluuga andis üsna sarnaseid tulemusi nii 12 mm kui ka 45 mm amplituudise kukkumisega. Joonistel 3.6 ja 3.7 on näha, et kõigi katseseinte puhul oli kanepiluu vajumise korrapära samasugune. Erinevus seisnes selles, et 45 mm kõrguse

kukkumisega oli kõigi katseseinte puhul vajumite hajuvus suurem. Ehk katseseintes tekkinud vajumid olid üksteise suhtes suurema erinevusega. Samuti 45 mm amplituudise katse puhul peaaegu kõigis katseseintes olev kanepiluu vajus rohkem kui 12 mm amplituudise katse korral. Tihendamata kanepiluu vajumid kukkumiskatsetel olid nii suured, et selliselt konstruktsiooni paigaldada seda materjali ei ole otstarbekas.



**Joonis 3.6.** Tihendamata kanepiluuga ja 45 mm kõrguse kukkumisega katseseintes kanepiluu vajumid



**Joonis 3.7.** Tihendamata kanepiluuga ja 45 mm kõrguse kukkumisega katseseintes kanepiluu vajumid

Kui kanepiluud on tihendatud, siis selleks, et puistematerjal edasi vajuks on vaja sellele rakendada järjest suuremat koormust. Kuna konstruktsioonis olevale soojustusmaterjalile ei tohiks mõjuda suuri koormusi, siis tihendatud kanepiluuga suure vajumise ohtu ei ole. Seega kasutades kanepiluud soojustusena tuleb seda tihendada.

Samasuguseid järeldusi puistematerjalide kohta on tehtud ka mitmes teises Eesti Maaülikoolis koostatud magistritöodes. Näiteks Andres Metsmägi, järeldas oma katsetest, et puistematerjaliga soojustamisel sõltuvad selle vajumid materjali tihedusest. Metsmägi kasutas kolme erinevat katsetoodikad nagu puistematerjali vertikaalne survestamine, vibrolaual vibreerimine ja käesolevas magistritöös rakendatud vertikaalset kukkumist. Tema uuris oma magistritöös saepuru, hõövlilaastu, tselluvilla, linaluud ja isegi klaasvilla ning kivivilla. Metsmäe uurimus näitas, et tihendamata puistematerjal on väga halva vastupidavusega väliste tegurite suhtes ning vajumid katseseintes ulatusid, kuni 27,8%. Tihendatud puistematerjalide puhul olid maksimaalsed vajumid 1,9%. Tihendamisel kasutas Metsmägi samasugust meetodikad nagu kasutati käesolevas magistritöös. (Metsmägi, 2008)

Oma magistritöös uuris Ain Siska erinevaid looduslikke puistematerjale. Tema kasutas samasid kolme meetodikad, mida Andres Metsmägi ning uuris kanepit, pilliroogu ja erineva fraktsiooniga turbaid ja nende vajumisi. Materjalide tihendamisel kasutas Siska samuti Metsmäe magistritöös kasutatud meetodikat. Selles töös toob autor välja samasuguseid järeldusi, et tihendatud puistematerjali vajumine on minimaalne ning tihendamata materjal vajub väga palju. Samuti mainib Siska, et katsetades tihendatud puistematerjale vajumisele need vajumise asemel pigem ajavad üle katseseina ääre. (Siska, 2009)

Tselluvillaga on Eesti Maaülikoolis samuti läbi viidud põhjalikum vajumite uurimus kasutades standardit EVS-EN 15101-1:2013. Kätlin Smoljakova uuris märgpaigaldatud ja kuivpaigaldatud tselluvilla vajumeid. Tema järeldas oma katsetest, et ilma liimaineteta kuivpaigaldatud tselluvilla konstruktsioonis kasutades on oluline selle tihedus. Väiksema tihedusega tselluvill vajuks rohkem ja suurema tihedusega vähem. Smoljakova katsed näitasid, et kuivpaigaldatud tselluvilla optimaalne paigaldustihedus on vahemikus 80...85 kg/m<sup>3</sup>. (Smoljakova, 2015)

## 4. SOOJUSERIJUHTIVUSE MÄÄRAMINE

### 4.1. Katsed Läti Põllumajandusülikoolis

Jelgavas asuvas Läti Põllumajandusülikoolis viisime läbi katsed, millega määrati kanepivilla katsekehade soojuserijuhtivus. Katsed tehti koos füüsika kateedri juhatajaga professor Uldis Grossiga. Eesmärk oli võrrelda kui palju erinevad Eesti Maaülikoolis mõõdetud soojuserijuhtivused teise meetodikaga määratud tulemustest. Võrdlus on tehtud peatükis 4.3.

Saadud tulemusi saab võrrelda sünteetiliste ja teiste alternatiivsete ehitusmaterjalidega ning järeldada, kas kanepivilla soojuserijuhtivus on piisavalt hea, et seda kasutada sünteetiliste soojustusmaterjalide asemel. Selline uuring võib osutuda eelduseks, et Eestis hakatakse kasutama kanepist soojustusmaterjale. Samuti võib see aidata kanepikasvatamise ja kanepitöötlemise tekkele Eestis.

#### 4.1.1. Katsekehad

Katsete läbiviimiseks kasutati Steico Canaflex kanepivilla plaate. Vill on toodetud ja kontrollitud vastavalt ETA-06/0040 nõuetele. Tootja poolt antud andmed on esitatud tabelis 4.1.

**Tabel 4.1.** 50 mm kanepivillaplaatide Steico Canaflex tehnilised näitajad (Steico, 2010)

Tooraine	kanepikiud, ammooniumfosfaat, polüolefiin kiud
Tuleohutusklass (EN 13501-1)	E
Ehitusmaterjali klass (DIN 4102)	B2
Deklareeritud soojuserijuhtivus $\lambda$ [W/mK]	0,043
Paksus [mm]	50
Soojatakistus R [(m <sup>2</sup> K)/W]	1,15 (50 mm)
Tihedus $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	ca. 40
Veeauru difusiooni takistuse tegur [J/(kg·K)]	1/2
Deklareeritud õhuvoolu takistus [(kPa·s)/m <sup>2</sup> ]	2
Erisoojus [J/(kg·K)]	1700



Tabelis 4.1 toodud soojuserijuhtivust saab võrrelda katsega määratud näitajatega. Katsekehasid, millele soojuserijuhtivust määrati oli kolm. Kanepivilla plaadid lõigati Eesti Maaülikooli laboris vajalikku mõõtu (300x300x50 mm) ketassaepingil. Katsekehad hoiti enne transportimist toatingimustes. Läti Põllumajandusülikooli transportimise ajaks pakiti katsekehad õhutihedalt pakkekilesse, et välistingimused neid võimalikult vähe mõjutaks.

#### 4.1.2. Katsetetoodika ja kasutatavad seadmed

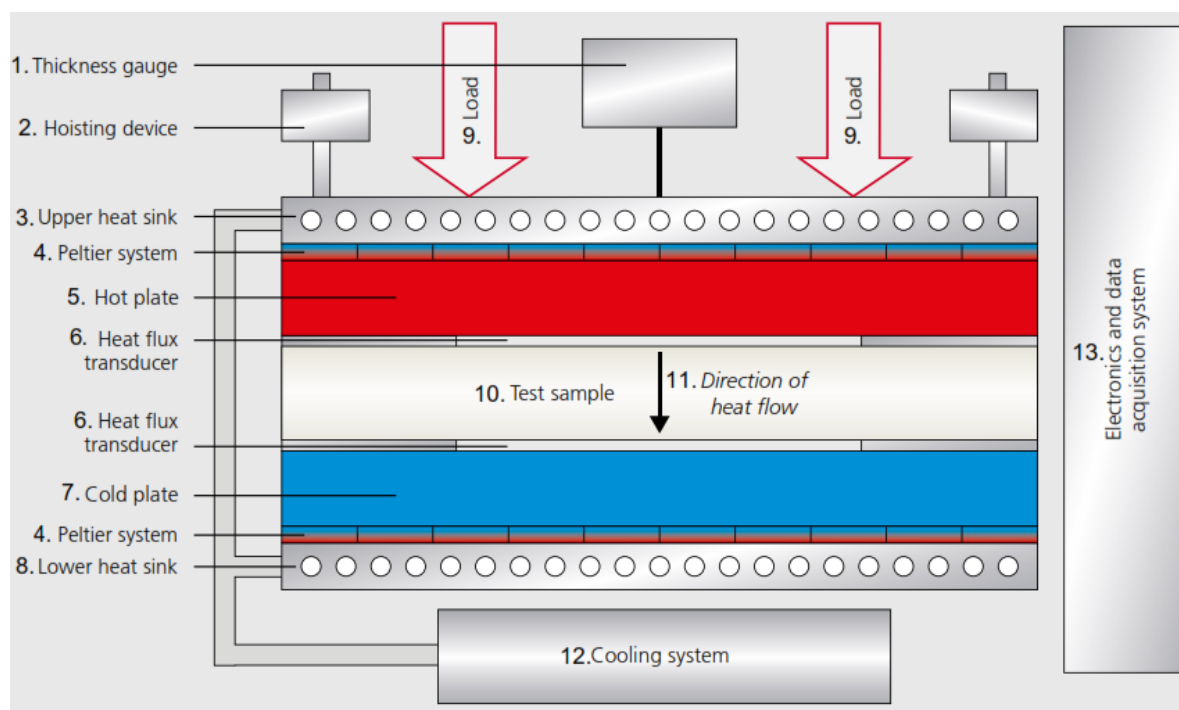
Katsete läbiviimiseks kasutati seadet HFM 436/3/1/E Lambda (joonis 4.1). Seade vajab jahutussüsteemi, et võimaldada katsetada materjale ka madalamatel temperatuuridel ja sellel konkreetsel seadmel oli jahutuseks seade Julabo FP 50 HE (joonis 4.2). Katse algandmete sisestamiseks ja mõõtmistulemuste salvestamiseks oli katseseadmega ühendatud arvuti, kus oli kasutusel Q-Test tarkvara.



**Joonis 4.1.** Katseseade HFM 436/3/1/E Lambda    **Joonis 4.2.** Jahutusseade Julabo FP 50 HE

**HFM 436/3/1/E Lambda.** Tegu on seadmega, mis on mõeldud materjalide soojuserijuhtivuse määramiseks. Katseseade annab täpseid tulemusi, mis vastavad standarditele ASTM C518 , ISO 8301 , JIS A1412 , DIN EN 12664 ja DIN EN 12667. Täpseid tulemusi on võimalik saada isegi 15 minuti jooksul, kui sisestatud algarvameetreid (temperatuure) on võimalik selle aja jooksul katseseadmes saavutada. Soojusvoo mõõtmise seadme skeem on näidatud joonisel 4.3. Seade on varustatud µm-resolutsiooni anduriga, mis võimaldab mõõta katsekeha täpset paksust. Aparaadil on viis soojusvoo andurit, mis asuvad alumise plaadi keskel. Mõõtmine toimub

samuti keskelt ning on isegi võimalus seadistada, et mõõtmine toimuks ainult kõige keskmise anduriga. Seadmega on võimalik katsekeha ka kokku pressid, et saavutada ühtlasem kontakt materjali ja plaatide vahel ning mõõta materjali soojuseri juhtivust kui selle tihedus on suurem. Soojuseri juhtivust on võimalik mõõta vahemikus 0,002...2.0 W/mK, täpsusega  $\pm 1...3\%$ . (NETZSCH, 2016)



**Joonis 4.3.** Katseseadme HFM 436/3/1/E Lambda skeem: 1 – paksuse mõõteriist; 2 – allalaskmise/ülestõstmise mehhanism; 3 – ülemine radikas; 4 - *Peltier*’i süsteem; 5 – kuum plaat; 6 – soojusvoo andur; 7 – külm plaat; 8 – alumine radikas; 9 – koormus; 10 – katsekeha; 11 – soojusvoo suund; 12 – jahutussüsteem; 13 – elektroonika ja andmete haldamise süsteem (NETZSCH, 2016)

Enne igat katset kalibreerib seade ennast kasutades NIST sertifitseeritud viitestandardit. Kasutajal on võimalik valida kalibreerimiseks ka mingi muu standardne materjal. Kõik vajalikud katsetulemused salvestatakse tarkvara poolt ning on pärast katset kättesaadavad arvutist. Osadel seadme mudelitel on katsete tulemused välja prinditavad seadmes asuvast printerist. (NETZSCH, 2016)

HFM 436/3/1/E Lambda on mõeldud madala soojuserijuhtivusega materjalidega katsetamiseks kuid seadmele on võimalik lisada mõõteriistade komplekt, millega saab mõõta ka suurema soojuserijuhtivusega materjale. Komplekti kuuluvad kokku pressitavad padjad ning termopaarid, mida saab paigutada katsekehade peale. (NETZSCH, 2016)

Mõõtmise alustamiseks on vaja paigutada katsekeha kuuma ja külma plaadi vahele. Plaatide temperatuure muudetakse vastavalt kasutaja sisestatud keskmistele temperatuuridele ja temperatuuride vahemikkudele. Plaadi temperatuurid on juhitud kahesuunalise kuumutamise/jahutamise *Peltier*'i süsteemiga. Soojuserijuhtivus arvutatakse, siis kui katseseadme mõõtmise kamber on saavutanud kasutaja sisestatud temperatuurid. (NETZSCH, 2016)

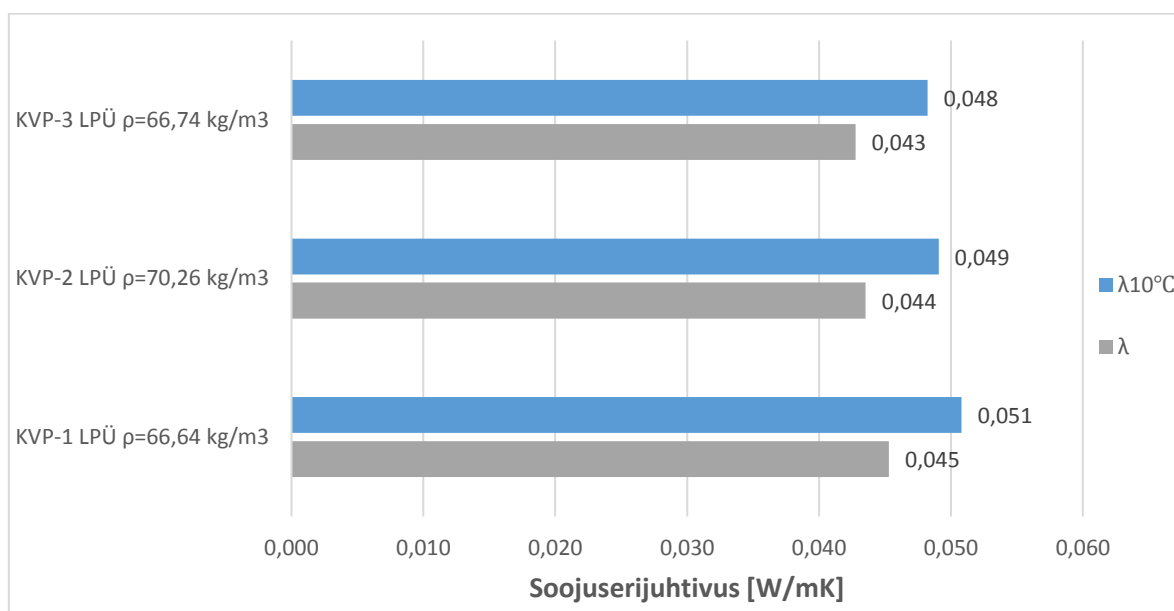
**Julabo FP 50 HE.** Tegu on jahutus- ja soojuspumbaga, millega on võimalik teha jahutamise või kuumutamise ülesandeid nii seadme väliselt kui ka selle sisse ehitatud anumal. Seade on varustatud võimsa tsirkulatsioonipumba süsteemiga ja on võimeline kiiresti saavutama madalaid või kõrgeid temperatuure. Võimalike temperatuuride vahemik on  $-50...+200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja temperatuuri hoidmise stabiilsus/täpsus  $\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ . (Julabo, 2017)

**Q-Test tarkvara.** HFM 436/3/1/E Lambda soojusvoo mõõtmise seade on varustatud tarkvaraga, mis asub seadme sisse ehitatud mikroprotsessoril. Q-Test tarkvara võimaldab seadet kasutada aparaadil asuva klaviatuuri ja ekraani abil. Samuti on võimalik seade ühendada arvutiga ja kasutada sama tarkvara Windowsi operatsioonisüsteemilt. Arvutil asuva tarkvaraga on rohkem võimalusi seadme programmeerimiseks ja katsetulemuste jälgimiseks ning käsitlemiseks. (NETZSCH, 2016)

#### 4.1.3. Katse tulemused

Katsetega mõõdetud soojuserijuhtivused ( $\lambda$ ) teisendati kasutades standardit EVS-EN ISO 10456:2008 deklareeritavate soojusväärtusteni täpselt  $10^{\circ}\text{C}$  juurde ( $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}$ ). Teisendatud väärtusele liideti tolerantsivahemiku piirväärtus. Teisendamisel ei ole arvestatud niiskuspõhise- ja vanaduspõhise teisendamisega vaid on kasutatud ainult temperatuuripõhist meetodit. Teisendamise valemid on esitatud peatükis 4.2.2. Kõik katses saadud andmed ja teisendamise

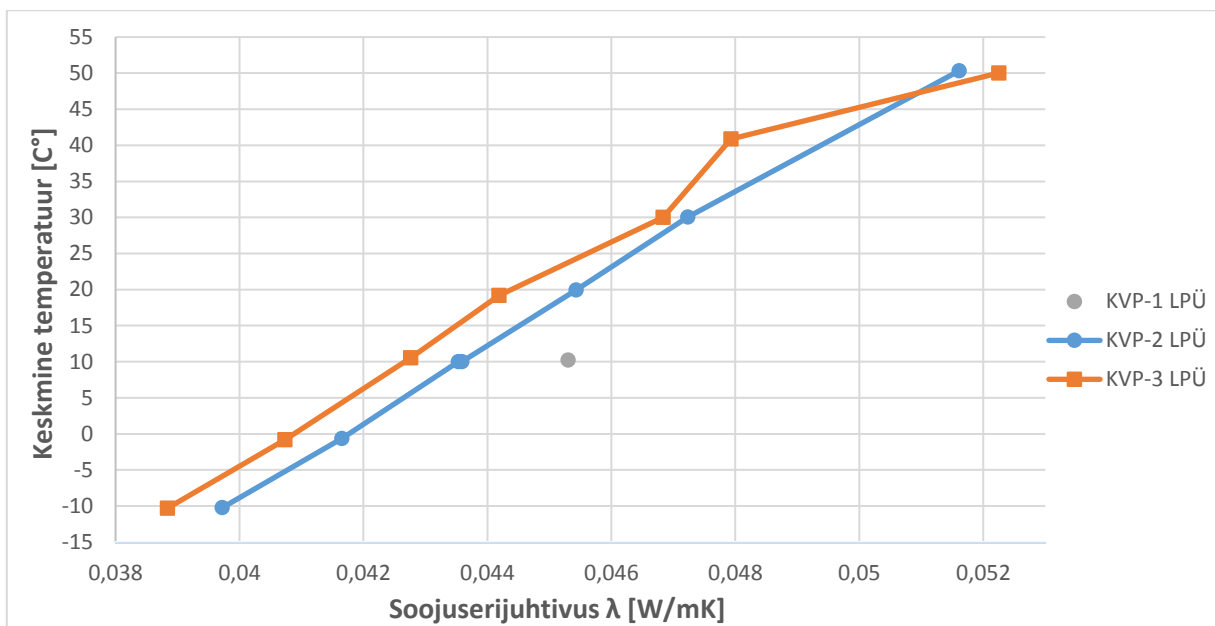
tegurid on esitatud lisas 3. Kanepivilla katsed soojusvoo mõõtjaga HFM 436/3/1/E Lambda näitavad, et tootja poolt deklareeritud soojuseri juhtivus 0,043 W/mK on parem kui katsetest saadud tulemused. Standardi EVS-EN ISO 10456:2008 järgi mõõdetud tulemusi deklareeritavatele väärtustele teisendades ja arvestades nimiväärtusele esitatavaid nõudeid tuli kolme katsekeha keskmiseks soojuseri juhtivuseks 10°C juures 0,049 W/mK. Joonisel 4.4 on kõigi katsekehade mõõdetud ( $\lambda$ ) ja teisendatud soojuseri juhtivused ( $\lambda_{10^\circ\text{C}}$ ). Katsekeha tähise järel on esitatud kuivatamata materjali tihedus.



**Joonis 4.4.** Läti Põllumajandusülikoolis (LPÜ) määratud ( $\lambda$ ) ja teisendatud ( $\lambda_{10^\circ\text{C}}$ ) kanepivilla (KVP) soojuseri juhtivused

Tabelis 1.1 on esitatud erinevate alternatiivsete soojustusmaterjalide tehnilised näitajad. Kirjandusest saadud andmete kohaselt jääb kanepivilla soojuseri juhtivus vahemikku 0,055...0,033 W/mK (Kalamees, 2002). Katsega määratud keskmine näitaja 0,049 W/mK on seal vahemikus. Samuti on tabelist 1.1 näha, et kanepivill on sarnaste soojuseri juhtivustega kui teised alternatiivsed soojustusmaterjalid. Näiteks linavilla soojuseri juhtivuse vahemik on 0,049...0,033 W/mK (Kalamees, 2002). Tööstuslike mineraalvillade soojuseri juhtivus on enamasti 0,035 W/mK. Kanepivillale määratud näitaja on mineraalvillade omast halvem, kuid kui eesmärgiks on kasutada looduslikku soojustusmaterjali on kanepivill soojuslike omaduste poolest sobilik kasutamaks hoonete soojustamiseks.

Järgmiseks uuriti kanepivilla soojuseri juhtivuse ja keskmise temperatuuri vahelist seost, Selleks määrati kahele uuritud kanepivilla katsekehale soojuseri juhtivused erinevate keskmiste temperatuuride juures. Keskmised temperatuurid ja nendele vastavad täpsed mõõdetud soojuseri juhtivused on toodud lisas 3 tabel L.3.3. Kasutades neid andmeid on koostatud keskmise temperatuuri ja soojuseri juhtivuse vahelise sõltuvuse graafik, mis on toodud joonisel 4.5.



**Joonis 4.5.** Kanepivilla soojuseri juhtivuse sõltuvus keskmisest temperatuurist

Graafikult on näha, et mida kõrgem on keskmine temperatuur seda suurem (halvem) on materjali soojuseri juhtivus.

## 4.2. Katsed Eesti Maaülikoolis

### 4.2.1. Katsekehad

Soojuseri juhtivust määrati erinevatele looduslikele soojustusmaterjalidele. Katsetes uuriti kanepivilla- ja puitvillaplaate, lahtist kanepilood, puistepuitvilla ning nelja erinevat kanepilood kergbetooni segu. Kergbetooni segud ja nende valmistamise meetodid on kirjeldatud käesoleva

magistritöö peatükis 2.1 ning kanepivilla tootja poolsed tehnilised näitajad on toodud peatükis 4.1.1. Tabelis 4.2 on näidatud katsekehad, millele soojuserijuhtivust määrati.

**Tabel 4.2.** Soojusvoo mõõtmiste katsekehad

Tähis	Materjal	Katsekehade arv
KVP	Kanepivillaplaat (50+50 mm)	3
PVP	Puitvillaplaat (40+40 mm)	2
PV	Puitvill (puiste)	4
KL	Kanepiluu (puiste)	3
MK1	Kergbetoon: kanepiluu, peensaepuru, hõõvlipuru, tsement, kustutatud lubi	2
MK2	Kergbetoon: kanepiluu, peensaepuru, hõõvlipuru, tsement, kustutatud lubi, tugevdav lisand	2
MK4	Kergbetoon: kanepiluu 80% , kustutatud lubi 14% , tsement 6%	3
MK5	Kergbetoon: kanepiluu 80% , savi 20%	3

Märkus. MK4 ja MK5 puhul on märgitud koostisosade mahuprotsendid (kuivaine)

Kõik katsekehad paigutatakse katseseina avasse mõõtmetega 300x300x100 mm seega, et katsekehad sinna mahuksid valmistati kõik katsekehad mõõtmetega 295x295x95 mm. Puistematerjalide puhul katseseina ava täideti puistega. Kuna kanepi- ja puitvillaplaate ei olnud katsete ajal saadaval 100 mm paksusega, kasutati ühe katsekehana kahte 50 mm paksust kanepivilla plaati ja kahte 40 mm paksust puitvilla plaati.

#### 4.2.2. Katseseadmed ja arvutusvalemid

**Kliimaseade Feutron 3007-5 (joonis 4.7).** Kliimaseade koosneb kliimakambrist (maht 252 dm<sup>3</sup>), külmaagregaadist ja sisekliima reguleerimise automaatsüsteemist. Kamber on ehitatud roostevabast terasest ja on isoleeritud väga hea soojustusmaterjaliga. Kliimakambris asuv ventilaator tekitab õhuringluse küttekeha, õhulööri ja külmutusagensi vahel. Tekitatud õhuvool on sujuv ja säilitab kambris konstantse ning ühtlase temperatuuri ja õhuniiskuse. Seadme agregaatideks on vesijahutusega kompressor, õhkjahutusega kompressor, kuivatid ja õhuniisutid. Kliimakambris on võimalik saavutada temperatuure vahemikus -32...+30 °C ja suhtelist õhuniiskust vahemikus 10...98 %. (Miljan M.-J., 2007)



**Joonis 4.7.** Feutron 3007-5 kliimakambri sisevaade ja koos katseseinaga

Kliimaseade on täiendatud kliimakambri sisekliima programmeeritava automaatjuhtimissüsteemiga ja mõõtmistulemuste digitaalsalvestussüsteemiga Almemo. Juhtimissüsteem on ühendatud lauarvutiga ning selle abil on võimalik kontrollida kambris olevaid temperatuure ja õhuniiskuse tasemeid. Samuti saab süsteemi abil juhtida automaatselt niisutuse, kütte ja jahutuse seadmeid või kondensiagregaati, reguleerides sellega kambris olevat sisekliimat. Automaatikaga saab kliimaseadmele määrata vajalikud väliskeskkonnatingimused eespool mainitud vahemikus. Suhtelist õhuniiskust saab reguleerida automaatikaga ainult positiivse temperatuuri juures. Niiskuse külmutamise meetodil on võimalik tekitada ka kuiva õhku. (Miljan M.-J., 2007)

**Andmesalvestaja Almemo 5690-2 (joonis 4.8).** Tegemist on digitaalse andmesalvestajaga, millega ühendatakse katse läbiviimiseks temperatuuriandurid ja soojusvoo plaat. Enne mõõtmiste algust antakse seadmele ette vajalikud tööülesanded. Näiteks tuleks andmesalvestajale ette määrata mõõtmistulemuste salvestamise ajavahemiku, mis oli selle katse puhul 1 minut. Seade salvestab mõõdetud pindade temperatuurid ja soojusvoo andmed määratud sagedusega. Soojuserijuhtivuse määramiseks salvestati andmesalvestajaga järgmised parameetrid:

- soojusvoog  $q$  läbi termiliselt homogeense katsekeha [ $\text{W/m}^2$ ];
- katsekeha soojema pinna temperatuur [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- katsekeha külmemä pinna temperatuur [ $^{\circ}\text{C}$ ].





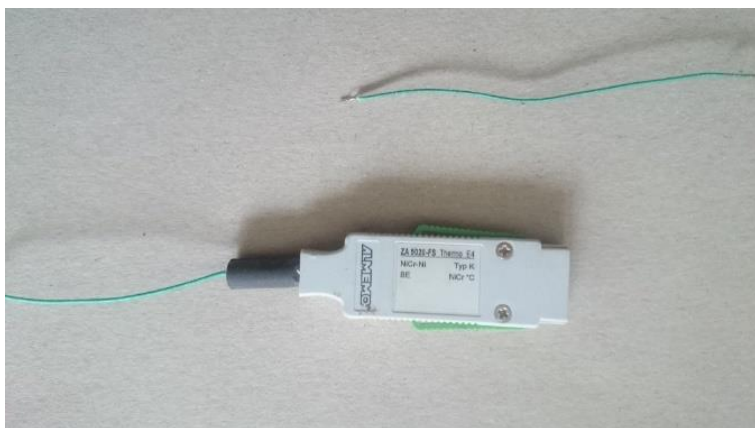
**Joonis 4.8.** Andmesalvestaja Almemo 5690-2

**Soojusvooplaat (Type FQ90119).** Plaat (joonis 4.9) koosneb vastas külgedel asuvatest termopaaridest. Soojusvooplaadi mõõtmispiirkonnale asetamisel käitub see soojustakistina ning mõõdab soojusvoogu. Üle kogu plaadi paksuse areneb temperatuurigradient proportsionaalselt soojusvoo tihedusega. Plaadi alusmaterjal on üles ehitatud nii, et sellel oleks vajalik kogus mõõtmistsoone. Tulemuseks saadud soojusvoog on kõigi plaadil asuvate termopaaride keskmine soojusvoog. Soojusvoo plaadi täiteks on epoksüüdvaik. Plaadi mõõtmed on 250x250x1,5 mm ja selle mõõtepiirkonnaks on 180x180 mm suurune ala. Soojusvooplaat talub kuni 80 °C kuumust ja selle mõõtmisviga on 25 °C juures 5 %. (Miljan M.-J., 2007)



**Joonis 4.9.** Soojusvoo plaat koos ühenduspistikutega vahtpolüstüreenist katseseinal.

**Temperatuuriandurid (ZA 9020-FS).** Katsete käigus kasutati NiCr-Ni termopaare (joonis 4.10), mis koosnevad kahest sulamist kokku joodetud 0,2 mm paksusest traatidest (Miljan M.-J., 2007). Temperatuuri mõõtmiseks kasutatakse termoelektrilist pinget, mille suurst sõltub temperatuuri erinevustest mõõtmispunkti ja ühendusseadme vahel (Miljan M.-J., 2007). Termopaar ühendatakse ühenduspistiku abil andmesalvestajaga. Mõõtmisvahemik on -200...1370°C (Almemo, 2016).



**Joonis 4.10.** Termopaar koos ühenduspistikuga

**Mõõtesond HygroClip S (joonis 4.11).** Tegemist on lisaseadmega, mida kasutatakse suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmiseks. Seadmega on võimalik mõõta õhuniiskust vahemikus 0...100% ja temperatuuri -40...+85°C. (Miljan M.-J., 2007)



**Joonis 4.11.** Mõõtesond HygroClip S kliimakambris

Lisaks soojusvoo mõõtmistele oli vaja määrata katsekehadele tihedused ja niiskussisaldused. Katsekehade mõõtmiseks kasutati digitaalset nihkkaliiberit, millega saab mõõta sajandiku

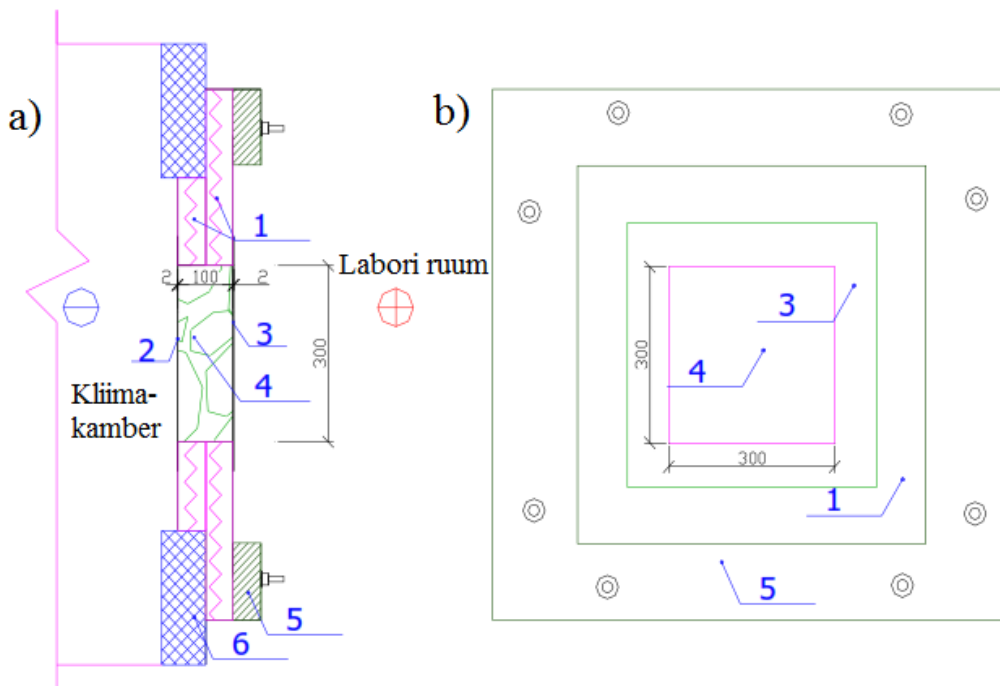
täpsusega. Niiskussisalduse määramiseks kasutati kuivatuskappi Memmert (joonis 4.12), mis seati kuivatamiseks 105°C peale. Katsekehad kaaluti enne kuivatuskambrisse panekut ning kuivatamise ajal kaaluti neid regulaarselt. Kui katsekehad olid saavutanud konstantse massi sai kuivatamise lõpetada ning välja arvutada nende niiskussisaldused. Raskemate katsekehade kaalumiseks kasutati digitaalset kaalu Kern FKB 36K0.1 ( $e=0,1$  g ja  $d=0,1$  g), millega on maksimaalselt võimalik kaaluda 36 000 g raskust. Kergemate katsekehade korral kasutati kaalu Kern 4200-2NM ( $e=0,1$  g ja  $d=0,01$  g), maksimaalse kaalumisvõimega 4200 g.



**Joonis 4.12.** Kuivatuskapp Memmert

#### **4.2.3. Katsemetoodika**

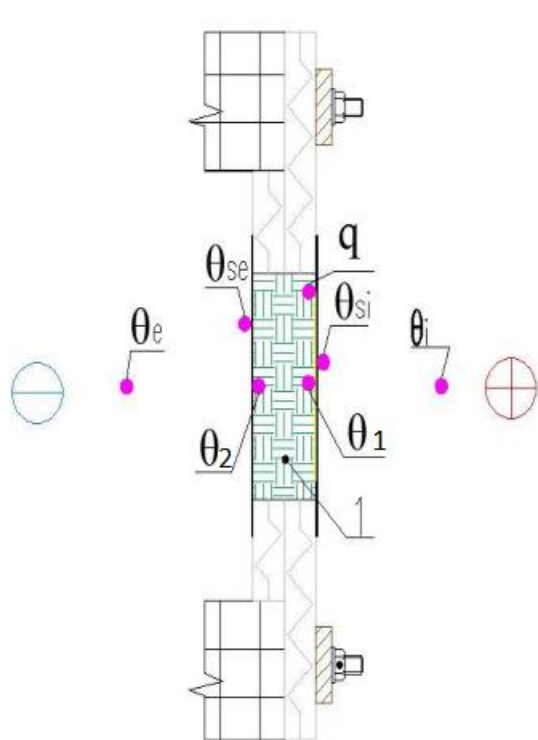
Soojusvoo mõõtmised viidi läbi kasutades nooremteadur Martti-Jaan Miljani väljatöötatud meetoodikat. Katsekehad paigutati kliimakambri Feutron 3007-5 katseseina avasse, mis on mõõtudega 300x300x100 mm. Selleks, et katsekehad mahuksid avasse oli vaja need valmistada mõõtudega 295x295x95. Katsesein koosneb kahest 50 mm paksusest vahtpolüstüreenplaadist, mille keskele on sisse lõigatud katsekeha jaoks ava. Katseseina skeem on kujutatud joonisel 4.13.



**Joonis 4.13.** Katseseina lõige (a) ja katseseina vaade ruumi poolt (b): 1 – vahtpolüstüreen 2x50 mm; 2 – jäik seinaplaat; 3 – lahtivõetav jäik seinaplaat; 4 – uuritav soojusisolatsioonimaterjal avas 300x300x100 mm; 5 – katseseina elemendi kinnitusraam; 6 – kliimakambri sein (Miljan M.-J., 2007)

Kanepivilla puhul paigutati katseseina avasse kaks 50 mm paksust kanepivilla plaati. Katsetades puitvilla pandi katseseina avasse kaks 40 mm paksust puitvilla plaati ja ülejäänud 20 mm täideti toa poolt tselluvillaga. Puitvilla plaatide ja tselluvilla vahele paigutati üks lisa termopaar. Puistematerjaliga täideti kogu katseseina ava.

Kui katsekeha paigutamisel avasse ilmnevad soojusvoo plaadi ja katsekeha vahelised ebatasasused või katsekeha külgedel tühimikud, siis need täidetakse tselluvillaga. See on oluline sellepärast, et soojusvoo plaat ja katsekeha peavad olema omavahel tihedas kokkupuutes. Samuti tühimike täitmisel on oluline, et katsekeha ja soojusvoo plaadi vahel ei toimuks konvektsiooni. Kliimakambri poolt on katseseina ava suletud fikseeriva plaadiga ning ruumi poole paigutati soojusvoo plaat. Katsesein paigutati kliimakambri ava juures olevatele poltidele. Selleks, et katseseina element fikseerida paigutati samadele poltidele puidust raam ning seejärel kinnitati see mutritega. Joonisel 4.14 on näha soojusvoo mõõtmise skeemi.



- $\theta_e$  - kliimakambri temperatuuri andur [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $\theta_{se}$  - katteplaadi kliimakambri poolne temperatuuriandur [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $\theta_1$  - uuritava materjali soojema pinna temperatuuriandur [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $\theta_2$  - uuritava materjali külmema pinna temperatuuriandur [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $q$  - soojusvoog läbi katseseina elemendi [ $\text{W/m}$ ];
- $\theta_{si}$  - katteplaadi ruumi poolne temperatuuriandur [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $\theta_i$  - ruumi temperatuuriandur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

**Joonis 4.14.** Soojusvoo katse skeem ja temperatuuriandurite paigutus:  $1$  – katsekeha 295x295x95 mm (Miljan M.-J., 2007)

Soojusvoo mõõtmiseks paigutati katsekeha mõlemale poolele kolm andurit. Mõõdeti materjali ja selle katteplaadi pinnatemperatuure ning õhutemperatuure mõlemalt poolt. Pärast katseseina ettevalmistamist anti andmesalvestajale ette vajalikud mõõtmisülesanded ning kliimakamber seati  $-15^{\circ}\text{C}$  peale. Selleks, et vähendada soojusvooplaadile mõjuvat õhuliikumist ruumis paigutati selle ette vahtpolüstüreenist plaat. Katsete ajal oli ruumi õhutemperatuur vahemikus  $19\ldots 23^{\circ}\text{C}$ . Iga katsekeha puhul toimus mõõtmise 2-3 päeva.

Saadud mõõtmistulemustega arvutati katsekehade soojuseri juhtivused valemiga 4.1. (EVS-EN ISO 7345:2006)

$$\lambda = \frac{q \cdot d}{(\theta_1 - \theta_2)} \quad , \quad (4.1)$$

kus,  $\lambda$  — soojuseri juhtivus [ $\text{W/mK}$ ]

- $q$  — soojusvoog läbi katseseina [W/m<sup>2</sup>];  
 $d$  — katseseina paksus [m];  
 $\theta_1$  — katsekeha soojema pinna temperatuur [°C];  
 $\theta_2$  — katsekeha külmema pinna temperatuur [°C].

Soojuseriijuhtivuse keskmise väärtuse leidmiseks kasutati statistilise keskmise valemit 4.2. (EVS-EN ISO 10456:2008)

$$\lambda_{mean} = \frac{\sum \lambda_i}{n}, \quad (4.2)$$

- kus,  $\lambda_{mean}$  — materjali keskmine soojuseriijuhtivus [W/mK];  
 $\sum \lambda_i$  — materjali soojuseriijuhtivuste summa [W/mK];  
 $n$  — mõõtmistulemuste arv.

Temperatuur esmastes piirtingimustes ( $T_1$ ) leiti valemiga 4.3.

$$T_1 = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}, \quad (4.3)$$

Temperatuuripõhine teisendustegur arvutati valemiga 4.4. (EVS-EN ISO 10456:2008)

$$F_T = e^{f_T \cdot (T_2 - T_1)}, \quad (4.4)$$

- kus,  $F_T$  — temperatuuripõhine teisendustegur [1/K];  
 $f_T$  — temperatuuripõhine teisenduskoeffitsient [1/K];  
 $T_1$  — temperatuur esmastes piirtingimustes [°C];  
 $T_2$  — temperatuur teisestes piirtingimustes (10°C / 23°C).

Deklareeritavale väärtusele teisendatud soojuseriijuhtivus ( $\lambda_{10^\circ\text{C}/23^\circ\text{C}}$ ) leiti valemiga 4.5. (EVS-EN ISO 10456:2008)

$$\lambda_{10^\circ\text{C}/23^\circ\text{C}} = \lambda * F_T \quad (4.5)$$

Standardhälve on arvutatud valemiga 4.6. (EVS-EN ISO 10456:2008)

$$s_{\lambda} = \sqrt{\frac{\sum(\lambda_i + \lambda_{mean})^2}{(n-1)}}, \quad (4.6)$$

kus,  $s_{\lambda}$  — soojuserijuhtivuse standardhälve;  
 $\lambda_i$  — soojuserijuhtivuse mõõtetulemus [W/mK];

Nimiväärtus peab vastama kvantiilile 90%, usaldusnivool 90%. Selle ühepoolse statistilise tolerantsivahemiku piirväärtuse  $L_s$  leidmiseks kasutatakse järgmist statistilist valemit (valem 4.7). (EVS-EN ISO 10456:2008)

$$L_s = \lambda_{mean} + k * s_{\lambda}, \quad (4.7)$$

kus,  $k$  — tegur ühepoolse tolerantsivahemiku leidmiseks. Kolme katse korral on teguriks 4,26.

#### 4.2.4. Katsete tulemused

Arvutatud soojuserijuhtivused teisendati deklareeritavate soojusväärtusteni referentstemperatuuridele 10°C ja 23°C standardi EVS-EN ISO 10456:2008 kohaselt. Teisendamist on tehtud ainult temperatuuripõhiselt ning ei ole kasutatud niiskus- ega vanusepõhist teisendamist. Sama standardi järgi on esitatud soojuserijuhtivused ümardatud kolme tüvenumbrini. Leitud on ka mõõtmistulemuste standardhälbed ja teisendatud soojuserijuhtivustele on liidetud tolerantsivahemike piirväärtused (valem 4.7).

MK4 seeriast, mis sisaldas kustutatud lupja, tsementi ja kanepiluud, oli katsekeha MK4-3 teistest liiga suure tiheduse erinevusega seega see jäeti kõigist keskmise arvutustest välja. Sama probleem oli katsekehaga PV-1 (puistepuitvill) ja see jäeti keskmiste arvutustest samuti välja. Mõlema katsekeha tulemused on eraldi olemas lisas 4.

Soojuserijuhtivuse arvutamiseks on kasutatud mõõtmistulemusi, mis on saadud soojusvoo stabiilses vahemikus. Kõigi katsekehade ja mõõtmiste andmed on esitatud lisas 4 tabelites L.4.1,

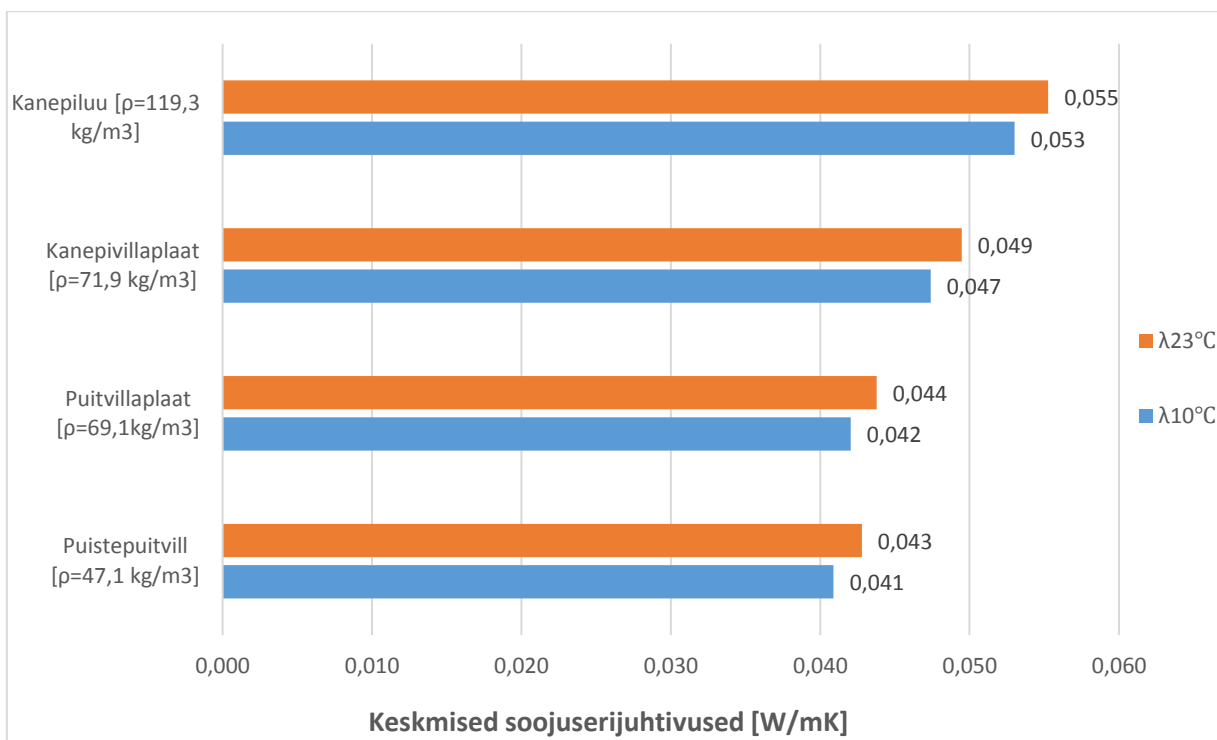


L.4.2 , L.4.3. Nende andmete põhjal on koostatud tabel 4.3, mis annab ülevaate uuritud plaatvillade ja puistematerjalide soojuseri juhtivustest.

**Tabel 4.3.** Villa plaatide ja puistematerjalide omadused

Tähis	Katsekeha	Keskmine tihedus	Keskmine veesisaldus	Keskmsed soojuseri juhtivused [W/mK]		
		kg/m <sup>3</sup>	%	$\lambda$	$\lambda_{10^{\circ}\text{C}}$	$\lambda_{23^{\circ}\text{C}}$
KVP	Kanepivillaplaat	71,9	6,64	0,043	0,047	0,049
PVP	Puitvillaplaat	69,1	7,33	0,036	0,042	0,044
PV	Puistepuitvill	47,1	9,32	0,039	0,041	0,043
KL	Kanepiluu	119,3	11,16	0,046	0,053	0,055

Tabeli 4.3 andmete põhjal on toodud joonisel 4.15 materjalide deklareeritavate soojusväärtusteni referentstemperatuuridele 10°C ja 23°C teisendatud soojuseri juhtivused  $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}$  ja  $\lambda_{23^{\circ}\text{C}}$ .



**Joonis 4.15.** Villaplaatide ja puistematerjalide keskmised soojuseri juhtivused

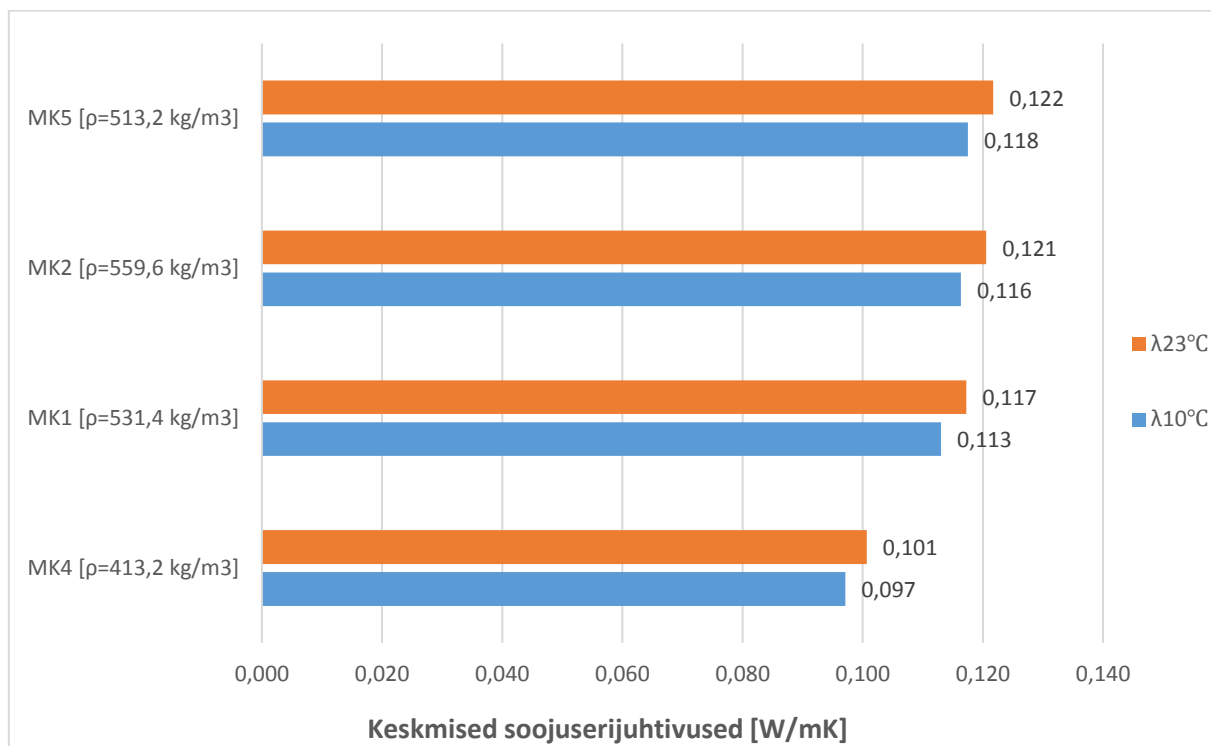
Puistematerjalidest ja villa plaatidest andis kõige paremaid tulemusi puistepuitvill, mille  $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}=0,041 \text{ W/mK}$  ja kõige halvema soojuseri juhtivusega oli kanepiluu, mille  $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}=0,053 \text{ W/mK}$ . Tabelisse 4.4 on toodud kanepiluuga kergbetoonide omadused.

**Tabel 4.4.** Kanepiluuga kergbetoonide omadused

Tähis	Keskmine tihedus	Keskmine veesisaldus	Keskmised soojuseri juhtivused [W/mK]		
	kg/m <sup>3</sup>	%	$\lambda$	$\lambda_{10^{\circ}\text{C}}$	$\lambda_{23^{\circ}\text{C}}$
MK1	531,4	12,90	0,110	0,113	0,117
MK2	559,6	12,31	0,108	0,116	0,121
MK4	413,2	8,99	0,087	0,097	0,101
MK5	513,2	3,11	0,110	0,118	0,122

Märkus. Segude koostised on toodud tabelis 4.2.

Tabeli 4.4 andmete põhjal on toodud joonisel 4.16 materjalide deklareeritavate soojusväärtusteni referentstemperatuuridele 10°C ja 23°C teisendatud soojuseri juhtivused  $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}$  ja  $\lambda_{23^{\circ}\text{C}}$ .

**Joonis 4.16.** Kanepiluuga kergbetoonide keskmised soojuseri juhtivused. Lühendite tähendused on toodud tabelis 4.2

Kergsegudest kõige halvema soojuseri juhtivusega oli katseseeria MK5, mis sisaldas kanepiluud ja savi ning mille  $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}=0,118 \text{ W/mK}$ . Kõik teised kergsegud olid valmistatud kasutades sideainena tsementi ja lupja. Katsekehad MK5 ja MK4 sisaldasid samas vahekorras kanepiluud (80%) kuid kasutati erinevaid sideaineid. MK4 puhul kasutati sideainena tsementi (6%) ja lupja

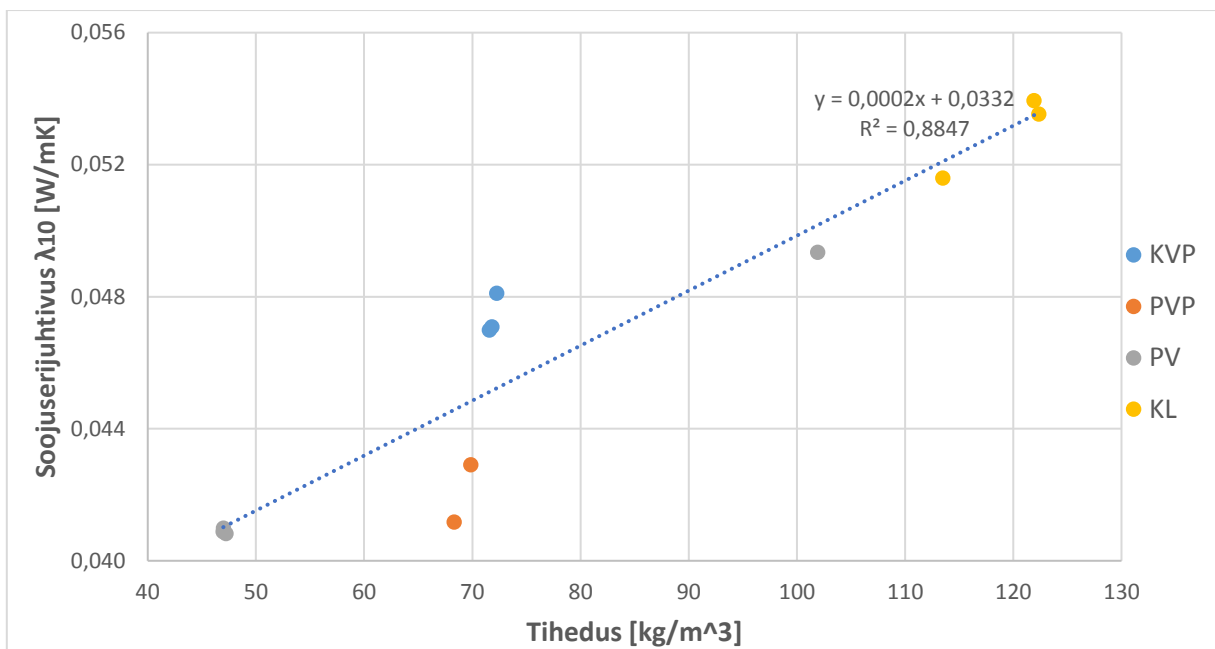
(14%) ning MK5 puhul savi (20%). Siit tulenevalt võib järeldada, et kanepiluu kergbetoonis ei ole mõistlik kasutada savi kui eesmärgiks on parema soojuserijuhtivuse saavutamine. Saviga on raskem saavutada väiksem materjali tihedus, mis mõjutab soojusjuhtivust väga palju.

Kanepist materjale eraldi vaadates on kõige paremate soojuslike omadustega kanepivilla plaat, mis on nendest ka kõige väiksema tihedusega. Sarnaste näitajatega on ka kanepiluu kuid natukene halvemate omadustega kui kanepivill, kuna luu tihedus on suurem.

Tabelis 1.7 on toodud MK4 katsekehadega sarnaste koostisosadega kergbetoonid. Tiheduse järgi on MK4 katsekehad võrreldavad tihendatud seina seguga, mille tihedus on  $440 \text{ kg/m}^3$  ja soojuserijuhtivus  $0,115 \text{ W/mK}$ . Jooniselt 4.16 näeb, et MK4 katsekehad on tihendatud seina segust väiksema tihedusega ja soojuserijuhtivusega.

Magistritöös „Tööstuskanepi omaduste uurimine ja kasutusvõimalused ehituses“ uuris Kristo Anslan samuti erinevaid kanepist soojustussegusid. Tema uuris kahte segu, milles on kanepiluu ja sideaine vahekord sama nagu on MK4 ja MK5 katsekehade puhul. Ühes segus oli temal 80% kanepiluud ja 20% kustutatud lupja ning teises 80% kanepiluud ja 20% savi. Savist katsekeha puhul sai Anslan tiheduseks  $452,6 \text{ kg/m}^3$  ning soojuserijuhtivuseks sai  $\lambda_{10^\circ\text{C}}=0,0848 \text{ W/mK}$ . Lubjast katsekeha puhul oli tiheduseks  $307,5 \text{ kg/m}^3$  ja soojuserijuhtivuseks  $\lambda_{10^\circ\text{C}}=0,0619 \text{ W/mK}$ . Kuna mõlema segu tihedused on väiksemad kui käesolevas magistritöös katsetatud MK4 ja MK5 katsekehad, siis on paremad ka soojuserijuhtivused. Kuid arvestada tuleb ka sellega, et Anslan uuris igast segust ühte katsekeha ning temal ei ole näitajates arvestatud standardhälvet ega tegurit  $L_s$  (valem 4.7), mis suurendavad soojuserijuhtivust. Kristo Anslani tulemustest on samuti näha, et savist ja kanepiluust katsekehad tulevad halvemate soojusisolatsiooni omadustega. Lubja ja kanepiluuga on samuti võimalik saavutada väikese tihedusega ja hea soojusisolatsiooni võimega segu.

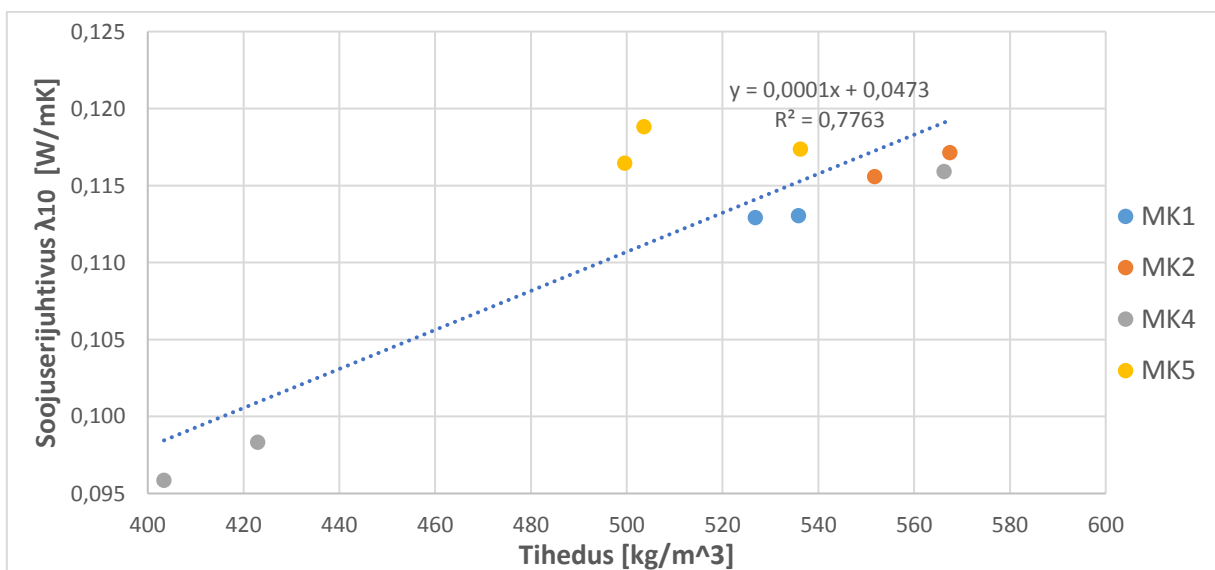
Plaatvilla ja puistematerjalide tiheduse ja soojuserijuhtivuse näitajad on toodud joonisel 4.17. Iga punkt joonisel tähistab ühte katsekeha ja selle tihedust ning soojuserijuhtivust.



**Joonis 4.17.** Plaatvillade ja puistematerjalide tiheduse ja soojuseriijuhtivuse vaheline seos.

Lühendite tähendused on toodud tabelis 4.2

Jooniselt 4.17 on näha, et soojuseriijuhtivus sõltub materjali tihedusest. Puistepuitvill on kõige väiksema soojuseriijuhtivusega ja ka kõige väiksema tihedusega. Kanepiluu, mis on kõige suurema soojuseriijuhtivusega on kõige suurema tihedusega.



**Joonis 4.18.** Kanepiluuga kergbetoonide tiheduse ja soojuseriijuhtivuse vaheline seos.

Lühendite tähendused on toodud tabelis 4.2

Jooniselt 4.18 on näha, et erandlikult on trendijoonest eemal kaks MK5 katsekeha, mille tihedus on küll osadest katsekehadest väiksem kuid soojuserijuhtivus suurem. Graafikutelt 4.17 ja 4.18 näeme, et enamuse tulemustest kinnitavad seose olemasolu tiheduse ja soojuserijuhtivuse vahel. Mida suurem on materjali tihedus seda suurem on selle soojuserijuhtivus.

A. Adamson ja H. Lindmaa raamat „Ehitusfüüsika 2“ ütleb, et mida kergem (poorsem) on materjal seda väiksem on tema soojuserijuhtivus. Põhilised ehitusmaterjalid koosnevad kõvast ainet ja poorides olevast õhust. Poorides oleva õhu soojusjuhtivus oleneb pooride läbimõõdust. Pooride läbimõõdu vähenemisega kahaneb ka õhu soojuserijuhtivus (Adamson, Lindmaa, 1977).

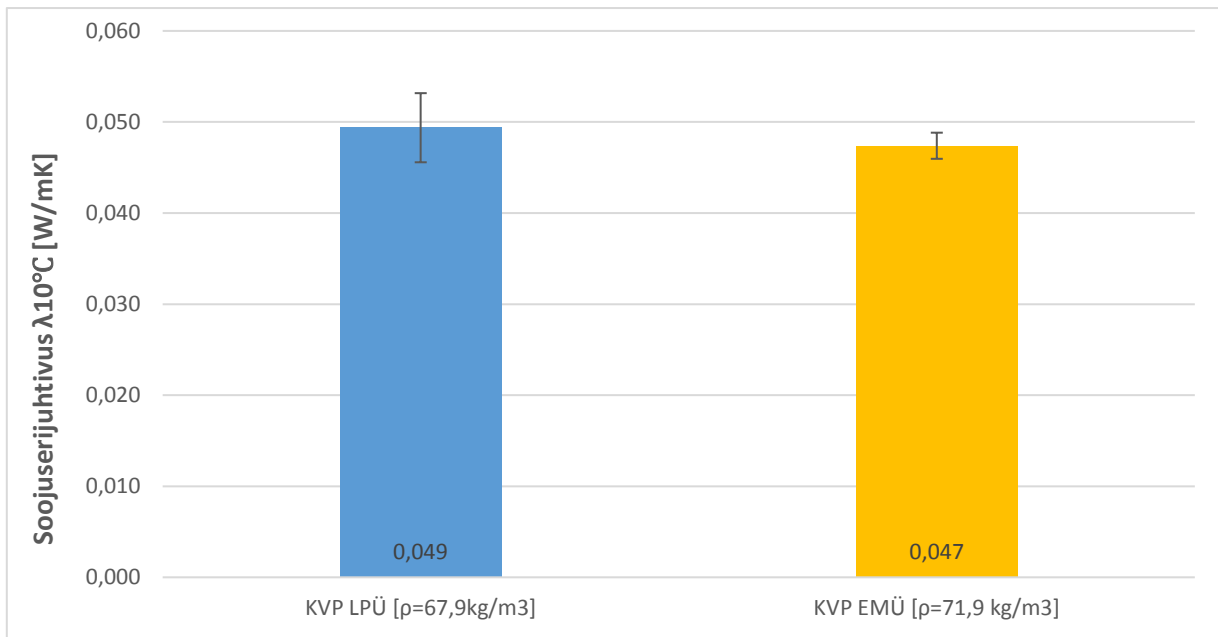
### 4.3. Läti Põllumajandusülikooli ja Eesti Maaülikooli katseseadmetega määratud kanepivilla soojuserijuhtivused

Läti Põllumajandusülikoolis määrati soojusvoo mõõtjaga HFM 436/3/1/E Lambda kolme kanepivilla plaadi soojuserijuhtivused. Katse tulemused on toodud lisas 3 tabelis L.3.3 ja katsetoodika on kirjeldatud peatükis 4.1.2. Samuti määrati kanepvilla plaatidest kolme katsekeha soojuserijuhtivused Eesti Maaülikoolis kliimakambriga Feutron 3007-5, mille tulemused on toodud lisas 4 tabelites L.4.1, L.4.2 ja L.4.3 ning katsetoodika on kirjeldatud peatükis 4.2.2. Katsetest saadud andmete põhjal on toodud tabelisse 4.5 määratud soojuserijuhtivused ( $\lambda$ ) ja deklareeritavale väärtusele teisendatud soojuserijuhtivused ( $\lambda_{10}$ ).

**Tabel 4.5.** Eesti Maaülikoolis (EMÜ) ja Läti Põllumajandusülikoolis (LPÜ) kanepivilla plaatidele määratud soojuserijuhtivused

Tähis	Tihedus	Keskmise tihedus	Keskmise temperatuur $T_1$	Soojuserijuhtivused [W/mK]			Standard-hälve
	kg/m <sup>3</sup>			$\lambda$	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ keskm.	$S_\lambda$
KVP-1 EMÜ	72,3	71,9	0,74	0,044	0,048	0,047	0,0006
KVP-2 EMÜ	71,6		0,67	0,043	0,047		
KVP-3 EMÜ	71,8		0,77	0,043	0,047		
KVP-1 LPÜ	66,6	67,9	10,23	0,045	0,051	0,049	0,001302
KVP-2 LPÜ	70,3		10,00	0,044	0,049		
KVP-3 LPÜ	66,7		10,53	0,043	0,048		

Kõik tabelis olevad kuus katsekeha on võetud samast kanepivilla pakendist. Keskmise temperatuur, mille puhul soojuserijuhtivus  $\lambda$  määrati on tabelis 4.5 tähisega T1, ehk temperatuur esmastes piiritingimustes. Tabeli 4.5 põhjal on koostatud joonisel 4.6 olev graafik, millel võrreldakse kahe erineva meetodikaga määratud soojuserijuhtivusi.



**Joonis 4.19.** Eesti Maaülikoolis ja Läti Põllumajandusülikoolis kanepivillale määratud ja teisendatud soojuserijuhtivused ( $\lambda_{10^\circ\text{C}}$ ). Sulgudes on kuivatamata materjali tihedus

Joonisel 4.19 on kõigi katsekehade deklareeritavate väärtustele teisendatud keskmised soojuserijuhtivused. Tulpadel asuvad jooned on teisendatud soojuserijuhtivuse ( $\lambda_{10^\circ\text{C}}$ ) usalduspiirid 95% tõenäosusega. Nagu näha, on Eesti Maaülikoolis määratud näitajad 0,002 W/mK (4%) võrra väiksemad. Mõlemast katsest saadud väärtustele liideti tolerantsivahemiku piirväärtused (valem 4.7), mille arvutamisel kasutati standardhälvet. Katsekehade KVP LPÜ standardhälve ( $s_\lambda=0,001302$ ) tuli palju suurem kui KVP EMÜ oma ( $s_\lambda=0,0006$ ). Seega nii suur soojuserijuhtivuste erinevus võis tuleneda teguri  $L_s$  liitmisest.

Tehtud katsetest ja nende tulemustest saame järeldada, et Eesti Maaülikoolis maaehituse osakonna ehitusfüüsika laboris määratud materjalide soojuserijuhtivused on igati aktsepteeritavad.

## 5. ADSORPTSIOONI KATSE

### 5.1. Katsekehad

Kanepist soojustusmaterjalide tasakaaluniiskuste uurimiseks kasutati tabelis 5.1 kirjeldatud katsekehasid. Kanepiluu kergbetoonide valmistamise meetod on kirjeldatud käesoleva magistritöö peatükis 2.1. Materjalid, millele määrati adsorptsiooni erinevate niiskustasemete juures, on samad, millele määrati ka soojuseri juhtivust. Adsorptsiooni katseks on võrdlemiseks lisatud ka tselluvill.

**Tabel 5.1.** Katsekehad adsorptsiooni uurimiseks

Tähis	Materjal	Katsekehade arv
KVP	Kanepivillaplaat (50 mm)	3
PVP	Puitvillaplaat (40 mm)	3
PV	Puitvill (puiste)	3
KL	Kanepiluu (puiste)	3
TsV	Tselluvill	
MK1	Kergbetoon: kanepiluu, peensaepuru, hõõvlipuru, tsement, kustutatud lubi	3
MK2	Kergbetoon: kanepiluu, peensaepuru, hõõvlipuru, tsement, kustutatud lubi, tugevdav lisand	3
MK4	Kergbetoon: kanepiluu 80% , kustutatud lubi 14% , tsement 6%	3
MK5	Kergbetoon: kanepiluu 80% , savi 20%	3

Märkus. MK4 ja MK5 puhul on välja toodud koostisosade mahuprotsendid (kuivaine)

Katsekehade valmistamisel lähtuti standardist EVS-EN ISO 12571:2013. Standardi kohaselt peab katsekeha kaaluma vähemalt 10 g ja olema 100x100 mm pinnaga ning katses peab kasutama samast materjalist vähemalt kolme katsekeha. Kanepivillast katsekeha mõõtmed olid 100x100x50 mm ja puitvillast katsekeha oli 100x100x40 mm. Puistematerjalid paigutati metallvõrgust pliiatsitopsidesse ning kergbetoonist katsekehad valmistati mõõtudega 100x100x100 mm.



## 5.2. Katsetooodika ja kasutatavad seadmed

Adsorptsiooni katse läbiviimisel on järgitud standardit EVS-EN ISO 12571:2013. Katse tulemustega saadi teada katsekehade tasakaaluniiskused erinevate suhtelise õhuniiskuse tasemete juures. Saadud tulemused paigutati graafikule, et saada adsorptsiooni kõver. Katse on oluline sellepärast, et niiskussisaldus materjalis suurendab selle soojuseri juhtivust, mis vähendab soojustuse isolatsioonivõimet. Suurem osa katsekehadest olid kanepist soojustusmaterjalid kuid võrdlemiseks katsetati ka teisi looduslikke materjale.

Valmistatud katsekehad kuivatati kuivatuskapis Memmert konstantse massini. Järgmisena paigutati katsekehad kliimakambrisse Rumed Type 3401 (joonis 5.1), kus seati esimeseks suhtelise õhuniiskuse tasemeks 30% temperatuuril 23°C. Kliimakambriga on võimalik saavutada temperatuure vahemikus -20°C kuni +60°C ja suhtelise õhuniiskuse taset 20...95% (RUMED, 2017).



**Joonis 5.1.** Rumed Type 3401 kliimakamber: *a* – kinnise uksega; *b* – avatud uksega (katsekehad nähtaval)

Pärast katsekehade paigutamist kliimakambrisse kaaluti neid iga 24h tagant. Kliimakambris tõsteti niiskuse taset kui katsekehad olid saavutanud konstantse massi, milleks arvestati kui kõigi katsekehade kahe viimase kaalutud masside vahe oli alla 0,2%. Tabelis 5.2 on esitatud neli läbiviidud niiskustaseme tsüklit ja nende kestvused päevades.

**Tabel 5.2.** Katses kasutatud niiskustasemed

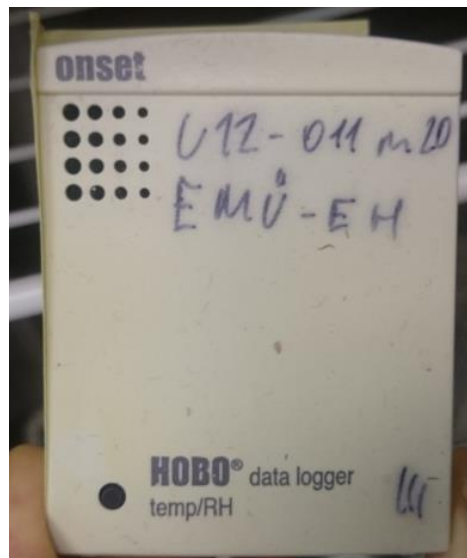
Tsükkel	Päevade arv	Temperatuur °C	RH%
1	4	23±1	30
2	4	23±1	45
3	5	23±1	60
4	5	23±1	75

Katsekehade kaalumiseks kasutati digitaalset kaalu Kern 4200-2NM, mis kuulub teise täpsuseklassi. Kaal näitab sajandiku täpsusega ( $d=0,01$  g) ja viga on  $e=0,1$  g. Selle kaaluga on võimalik maksimaalselt kaaluda kuni 4200 g. Kaal on toodud joonisel 5.2.

Kuigi kliimakambri ekraanil on olemas temperatuuri ja niiskustaseme näidud pandi kliimakambri sisetingimuste täpsema ülevaate saamiseks sisse andmeloger HOBO U12-011 (temp/RH). Andmeloger on näidatud joonisel 5.3.



**Joonis 5.2.** Kaal Kern 4200-2NM



**Joonis 5.3.** HOBO U12-011 andmeloger

### 5.3. Katse tulemused

Katsekehade kaalumisel saadud masside erinevustest arvutati välja iga katsekeha jaoks selle niiskussisaldus (valem 2.3) iga suhtelise õhuniiskuse (RH) taseme juures. Seejärel arvutati iga kolme katsekeha keskmine niiskussisaldus. Adsorptsioonigraafiku koostamiseks kasutati iga suhtelise õhuniiskuse taseme juures kõige viimase kaalumise tulemusi, kuna just siis on materjal saavutanud oma tasakaaluniiskuse sisalduse. Tabelis 5.3 on toodud katsekehade tasakaaluniiskused uuritud suhtelise õhuniiskuse vahemikus.

**Tabel 5.3.** Igast seeriast kolme katsekeha keskmised tasakaaluniiskused protsentides

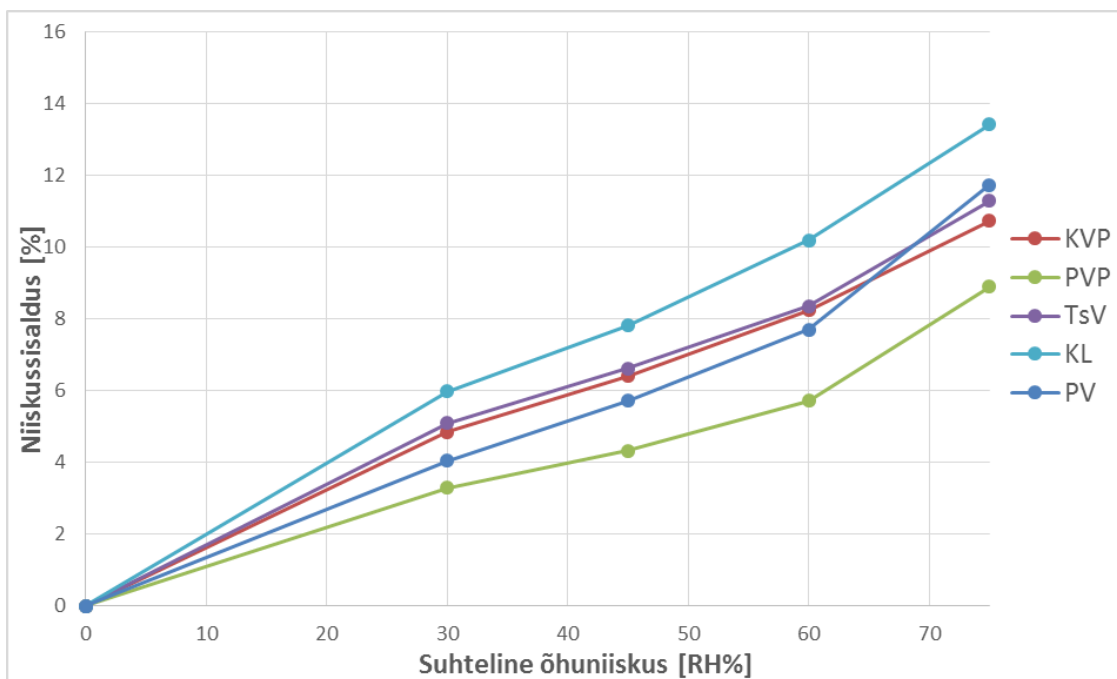
Nr.	Tähis	Katsekeha	Keskmine tihedus kg/m <sup>3</sup>	Tasakaaluniiskused vahemikus 30...75 RH% [%]			
				30	45	60	75
1	KVP	Kanepivillaplaat	68,5	4,85	6,40	8,24	10,73
2	PVP	Puitvillaplaat	65,3	3,28	4,33	5,72	8,90
3	TsV	Tselluvill	65,0	5,09	6,62	8,36	11,29
4	KL	Kanepiluu	119,3	5,97	7,81	10,18	13,42
5	PV	Puistepuitvill	60,8	4,05	5,71	7,69	11,73
6	MK1	Kergbetoon	499,9	3,40	4,74	6,65	8,93
7	MK2	Kergbetoon	528,0	3,48	4,93	6,84	9,06
8	MK4	Kergbetoon	570,2	2,95	4,12	5,75	7,94
9	MK5	Kergbetoon	588,0	1,70	2,37	3,22	4,29

Märkus. Kergbetooni segude koostised on toodud tabelis 5.1.

Katsed olid läbi viidud ka kahe kõrgema suhtelise õhuniiskuse tasemega, kuid neid andmeid ei ole esitatud kuna kõrgemate tasemete puhul muutus keskkond kliimakambris ebastabiilseks. Mõõtmisi teostati RH tasemetel 90% ja 95% ning HOB0 andmelogerist saadud andmed näitasid, et nende tasemete juures toimus kliimakambris väga suur suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri kõikumine. Seega on adsorptsioonigraafik koostatud kasutades andmeid, kus andmelogeri järgi oli kliimakambris stabiilne sisekliima.

Enne katsekehade kliimakambrisse panekut need mõõdeti ning arvutati ruumalad ja tihedused. Need näitajad on esitatud lisas 5 tabel L.5.1. Kuna puistematerjalid olid pandud ümarate nurkadega, metallvõrgust pliiatsitopsidesse, mis ei olnud kuju järgi täpselt mõõdetavad, siis ei olnud võimalik adsorptsiooni katse raames määrata nende materjalide täpset tihedust. Kanepiluu ja puistepuitvilla tihedused on võetud käesolevas magistritöös soojusvoo katses määratud

andmetest. Kuna tselluvilla topsidesse paigaldamisel seda tihendati, siis selle tiheduseks on võetud tabelist 1.1 kõige suurem tihedus, milleks on  $65 \text{ kg/m}^3$ . Tabelis 5.3 olevate andmete põhjal on koostatud joonised 5.4 ja 5.5.

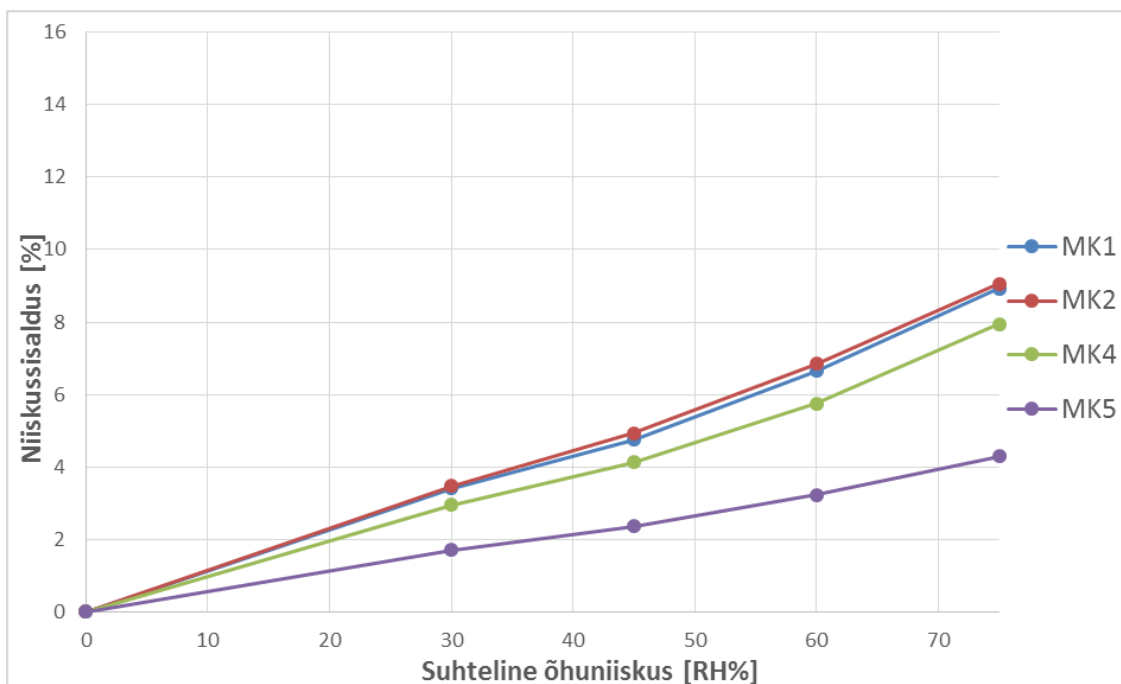


**Joonis 5.4.** Villade ja puistete adsorptsioonigraafik. Lühendite tähendused on toodud tabelis 5.3

Jooniselt 5.4 on näha, et kõige suurema niiskussisaldusega on kanepiluu ja kõige väiksemaga puitvillaplaadid. Kirjanduse järgi on kanepiluu võimeline imama niiskust nelja kordselt oma kuivmassist (Carus jt, 2013). Siit võib järeldada, et kasutades kanepiluud soojustusena on väga oluline seda kasutada kohtades kuhu niiskus ei pääse või tuleb niiskuse juurdepääs takistada.

Kanepiluu vette paigutamisel tõuseb selle niiskussisaldus esimese minuti jooksul 181%. Järgneva 48h jooksul saavutab kanepiluu umbes 450% niiskussisalduse. Kanepiluu niiskussisaldus on oluline, kuna see mõjutab materjali kasutamist kergbetoonis. Segu valmistamisel imavad nii kanepiluu kui ka sideaine vett. Kuna kanepiluu imab vett väga kiiresti mõjutab see kui palju jääb segus vett sideainele. Selline täiteaine omadus ei ole hea, sest kui sideainele ei jää piisavalt vett mõjutab see negatiivselt materjali kõvastumist ja vähendab selle tugevust. (Page jt, 2017)

Joonisel 5.5 on kanepiluuga kergbetoonide adsorptsioonigraafik.



**Joonis 5.5.** Kanepiluuga kergbetoonide adsorptsioonigraafik. Kergbetooni segude koostised on toodud tabelis 5.1

Jooniselt 5.5 näeme, et kergbetoonidest imasid kõige vähem niiskust erinevate suhtelise õhuniiskuse tasemete juures katsekehad MK5, mis olid valmistatud savist ja kanepiluust. MK5 katsekehad olid ka kõige suurema keskmise tihedusega. Kõige rohkem imasid niiskust katsekehad MK2, mis sisaldasid peensaepuru, hõõvlipuru, tsementi, kustutatud lupja, kanepiluud ja tugevdavat lisandit. MK1 katsekehade niiskusimavus oli peaaegu samasugune MK2 katsekehadega, kuna nende koostisosad olid samad. Erinevus MK1 ja MK2 katsekehades seisnes koostisosade vahekorras ja MK1 ei sisaldanud tugevdavat lisandit. MK1 ja MK2 katsekehade sideaine põhiosaks oli tsement ja vaid vähesel määral kustutatud lupja.

## KOKKUVÕTE

Meid ümbritsev keskkond on kogu inimkonna jaoks elulise tähtsusega süsteem. Selleks, et seda süsteemi mitte üle kurnata tuleb panustada nii arengusse kui ka säästmisesse. Sellist kontseptsiooni kutsutakse jätkusuutlikuks arenguks ja see tähendab, et rahuldatud on praeguse põlvkonna vajadused ja püüdlused kuid ei ole seatud ohtu järgnevate põlvkondade samasugused huvid. Maailmas kasvava inimeste populatsiooni tõttu on väga oluline arendada uusi tehnoloogiaid ja lahendusi, mis tagavad meie püsijäämise. Kuid sama oluline on järjest rohkem õppida kasutama taastuvaid ressursse ning taastumatuid säästma ja taaskasutama.

Üks sellistest taastuvatest ressurssidest on kanep. See taim on võimeline kasvama väga erinevates kliima- ja pinnasetingimustes ning seega on selle kohalikuks ressursiks muutmine võimalik paljudes maailma kohtades. Oma kasvuperioodi jooksul seob kanep suuri koguseid süsihappegaasi aidates sellega hoida puhtana meid ümbritsevat keskkonda. Kanep on multifunktsionaalne taim ja seda on võimalik kasutada väga paljudes tööstusvaldkondades kaasa arvatud ehituses.

Hoonete soojustamiseks toodetakse kanepikiust näiteks kanepivilla, mis on omaduste poolest konkurentsivõimeline sünteetiliste villadega. Kanepiluud saab kasutada puistematerjalina välispiirete soojustamiseks ning seda on võimalik kasutada täiteainena kergbetoonis. Kanepiluuga soojustussegusid saab valmistada erinevate koostisosade vahekorraga ja väikseima tihedusega kergbetooni segud on soojuseri juhtivuse poolest heal tasemel. Kanepi vartest saab valmistada kanepiplaati, mis sobib hästi näiteks savi- või lubikrohvi alusmaterjaliks ning on heade soojust isoleerivate omadustega. Kasutusvõimalusi on veel ja paljusid võimalusi alles uuritakse.

Magistritöö eesmärgiks oli anda ülevaade kanepi kasutusvõimalustes nii ehituses kui ka teistes tööstusvaldkondades. Selle eesmärgi täitmiseks uuriti kirjandust ning selle põhjal koostati uurimustöö esimene peatükk. Samuti teostati erinevaid katseid, et määrata kanepist soojustusmaterjalide omadusi. Magistritöös on kasutatud mitmeid erinevaid katsetoodikaid

ja Eesti Vabariigis kehtivaid standardeid ning sellega on antud ülevaade järgmistele kanepiteemaliste uurimustööde koostajatele, mida ja kuidas edasi uurida.

Survetugevuse katsed kinnitasid juba teadaolevat tõsiasja, et kanepiluu kergbetoonist ei ole võimalik ehitada kandvaid konstruktsioone kuid sellise materjaliga soojustades aitab see jäigastada hoone kandvat karkassi. Kanepiluu kergbetooni survetugevuse uurimiseks viidi läbi katsed kolme erineva pressiga, et määrata nende survetugevused 10% deformatsioonil. Kanepiluu kergbetoonist valmistatud katsekehade survetugevused olid vahemikus 1,107...1,676 MPa. Kõige tugevamaks osutusid katsekehad MK4, mis olid valmistatud kanepiluust, kustutatud lubjast ja tsemendist.

Kanepiluud saab kasutada soojustamiseks puistematerjalina. Kanepiluu vajumise uurimiseks viidi läbi kukkumiskatsed, kus kasutati kukkumislaua amplituutidega 45 mm ja 12 mm. Mõlema amplituudiga katsetati katseseinu, milles oli tihendatud ja tihendamata kanepiluu. Vajumise katsete tulemustest oli näha, et tihendamata kanepiluuga esinesid katseseinaelementides suured puistematerjali vajumid ja tihendatud kanepiluuga katseseintes suuri vajumeid ei olnud.

Soojusvoo katsed kanepivillaga näitasid, et Eesti Maaülikoolis ja Läti Põllumajandusülikoolis soojuserijuhtivuse määramise meetodikad on usaldusväärsed. Eesti Maaülikoolis kasutati soojusvoo mõõtmiseks kliimakambrit Feutron 3007-5 ja Läti Põllumajandusülikoolis katseseadet HFM 436/3/1/E Lambda. Kahe erineva meetodiga määratud kanepivilla soojuserijuhtivused erinesid 0,002 W/mK (4%) võrra, mis võis tuleneda vähestest katsetulemustest ja nende standardi järgi teisendamisest. Eesti Maaülikoolis katsetatud puistematerjalidest ja villa plaatidest oli kanepivill kõige väiksema soojuserijuhtivusega  $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}=0,047$  W/mK ja kõige suuremaga oli kanepiluu  $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}=0,053$  W/mK. Kanepiluu kergbetooni segudest oli kõige väiksema soojuserijuhtivusega katseseeria MK4, mille  $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}=0,097$  W/mK. See kergbetooni segu sisaldas 14% kustutatud lupja, 6% tsementi ja 80% kanepiluud. Kõige suurema soojuserijuhtivusega olid katsekehad MK5, mille  $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}=0,118$  W/mK. See kergbetooni segu sisaldas 20% savi ning 80% kanepiluud.

Adsorptsiooni katse andis ülevaate, millised kanepist soojustusmaterjalid on kõige suurema niiskusiimavusega. Katsekehade tasakaaluniiskuste määramiseks erinevate suhtelise



õhuniiskuse tasemete juures kasutati kliimakambrit Rumed Type 3401. Kergbetoonidest imasid kõige vähem niiskust katsekehad MK5 ja kõige suurema niiskussisaldusega erinevate suhtelise õhuniiskuse tasemete juures olid katsekehad MK2. Puistematerjalidest ja villa plaatidest imas kõige rohkem niiskust kanepiluu ja kõige vähem puitvilla plaadid. Siit ka järeldus, et kasutades kanepiluud soojustusena tuleks seda kindlasti kaitsta niiskuse eest või kasutada kohtades, kus niiskumine ei ole ohuks.

Edaspidi oleks vaja uurida põhjalikumalt erinevaid kanepiluu kergbetooni segusid ja nende omadusi. Erinevaid segu koostisi on palju ning selles magistritöös on uuritud ainult väikest osa nendest. Samuti oleks vaja uurida kanepist ehitusmaterjalide kestvust. Näiteks külmakindlust ja püsivust pikema aja vältel kasutuses olevas hoones. Kuna kanepist ehitusmaterjalide tootmine ja nendest ehitamine ei ole Eestis eriti tuntud, siis oleks vaja uurida praegustes tingimustes ehituse maksumust kanepist hoonele Eestis.

## VIIDATUD KIRJANDUS

1. **Adamson, A., Lindmaa, H.** (1977). Ehitusfüüsika 2. Tallinn: TPI kirjastus, 56 lk.
2. **Allegret, S.** (2013). The history of hemp. - Hemp: industrial production and uses /Pierre Bouloc. Wallingford: CABI International, lk 4-26.
3. **Allin, S.** (2005). Building with hemp. Kenmare: Seed Press, 191 lk.
4. **Almemo.** (2016). Almemo measuring instruments (toodete instruksioon), lk 85.
5. **Amaducci, S., Gusovius, H.-J.** (2010). Hemp - cultivation, extraction and processing. - Industrial applications of natural fibres: structure, properties and technical applications /Jörg Müssing. Chinchester: Wiley, lk 110.
6. **American Lime Technology.** (2017). [on-line] <http://www.americanlimetechnology.com/tradical-hemcrete/>. (7.04.2017).
7. **Anslan, K.** (2015). Tööstuskanepi omaduste uurimine ja kasutusvõimalused ehituses. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu, lk 21, 29, 40, 46, 52, 54.
8. **Arnaud, L., Boyeux, B., Hustache, Y.** (2013). Hemp and the construction industry. - Hemp: industrial production and uses /Pierre Bouloc. Wallingford: CABI International, lk 239-259.
9. **Bevan, R., Woolley, T.** (2008). Hemp lime construction. Bracknell: IHS BRE Press, 111 lk.
10. **Brigitte, C., Kurek, B., Behec, O.** (2013). Physiology and botany of industrial hemp. - Hemp: industrial production and uses /Pierre Bouloc. Wallingford: CABI International, lk 27-47.
11. **Carus, M., Karst, S., Kaufmann, A., Hobson, J., Bertucelli, S.** (2013). The European Hemp Industry: Cultivation, processing and applications for fibres, shivs and seeds. EIHA.
12. **Collet, F., Bart, M., Serres, L., Miriel, J.** (2007). Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials - Construction and building materials. / Vol. 22. ELSEVIER, lk.1271-1280.
13. **Collet, F., Pretot, S.** (2014). Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. - Construction and building materials. / Vol. 65. ELSEVIER, lk. 612-619.
14. **Conserv.** (2017). [on-line] <http://www.lime-mortars.co.uk/articles/hydraulic-lime-which-nhl>. (6.04.2017).
15. **Desanlis, F., Cerruti, N., Warner, P.** (2013). Hemp agronomics and cultivation. - Hemp: industrial production and uses /Pierre Bouloc. Wallingford: CABI International, lk 98-124.

16. **EIEL.** (2017). [on-line] [http://www.eiel.ee/web/index.php?lang=et&page\\_id=36](http://www.eiel.ee/web/index.php?lang=et&page_id=36). (21.05.2017).
17. **EVS-EN 12390-3:2009.** Kivistunud betooni katsetamine. Osa 3: Katsekehade survetugevus. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
18. **EVS-EN 1354:2005.** Avatud pooridega kergbetooni survetugevuse määramine. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
19. **EVS-EN 15101-1:2013.** Ehituslikud soojusisolatsioonitooted. Kasutuskohas valmistatavad puistetselluloosist (LFCI) tooted. Osa 1: Toodete spetsifikatsioon enne paigaldamist. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
20. **EVS-EN 1602:2013.** Thermal insulating products for building applications - Determination of the apparent density. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
21. **EVS-EN 826:2013.** Thermal insulating products for building applications - Determination of compression behaviour. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
22. **EVS-EN ISO 10456:2008.** Ehitusmaterjalid ja -tooted. Soojus- ja niiskustehnilised omadused. Tabuleeritud arvutusväärtused ja deklareeritavate ning arvutusväärtuste määramise meetodid. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
23. **EVS-EN ISO 12571:2013.** Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of hygroscopic sorption properties. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
24. **EVS-EN ISO 7345:2006.** Soojusisolatsioon. Füüsikalised suurused ja määratlused. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
25. **Free Cannabis.** (2017). [on-line] <http://freecannabis.net/hemp-uses/hemp-fibre/>. (27.03.2017).
26. **Hemp Eco Systems.** (2017). [on-line] <http://www.hempecosystems.com/>. (10.05.2017).
27. **Horne, M.** (2012). Bast fibres hemp cultivation and production. - Handbook of natural fibres /Ryszard Kozłowski. 1. trükk. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, lk 114-145.
28. **Julabo.** (2017). FP50-HE Refrigerated/heating circulator (Toote infoleht). Saksamaa.
29. **Kalamees, T.** (2002). Alternatiivseid soojustusmaterjale puitkarkasshoonetele. Ehitaja 7-8 (71-72), lk 11-14.
30. **Kask, Ü.** (2014). Metsakonsulentide koolitus (loengumaterjal). Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
31. **Khestl, F.** (2009). Hemp: rediscovered raw building material. - Challenges, opportunities and solutions in structural engineering and construction /Nader Ghafoori. Boca Raton: CRC Press, lk 495-500.
32. **Kinnane, O., Reilly, A., Grimes, J., Pavia, S., Walker, R.** (2016). Acoustic absorption of hemp-lime construction. - Construction and building materials. / Vol. 122. ELSEVIER, lk. 674-682.

33. **Lhoist Group.** (2017). [on-line] <http://www.tradical.com/hemp-lime.html>. (7.04.2017).
34. **Liivlaid, H.** (2013). Täitematerjalid kergbetooni tootmiseks. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu, lk 27.
35. **Metsmägi, A.** (2008). Puidust kergseinte soojustamine, omadused ja kestvus. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu, lk 24, 27-33.
36. **Miljan, M.-J.** (2007). Kohalike soojusisolatsioonimaterjalide kasutamine piirdekonstruktsioonides. Tartu: Eesti Maaülikool, lk 31-35.
37. **Miljan, M.-J., Miljan, J.** (2012). Kohalikud ja looduslikud ehitusmaterjalid ja nende kasutamine. Tartu: Salibar OÜ, lk 33.
38. **NETZSCH.** (2016). Heat Flow Meter - HFM 436 Lambda (toote infoleht). Saksamaa.
39. **Page, J., Sonebi, M., Amziane, S.** (2017). Design and multi-physical properties of a new hybrid hemp-flax composite material. - Construction and building materials. / Vol. 139. ELSEVIER, lk. 502-512.
40. **Priesnitz, R.** (2006). Hemp for houses. - Natural life magazine. Rolf Priesnitz, lk 14-17.
41. **RT I, 03.07.2015, 34.** Eluruumile esitatavad nõuded. nr. 85. § 4 lg 3-6.
42. **RT I, 28.02.2017, 2.** Hoone energiatõhususe miinimumnõuded. nr. 55. § 12 lg 1-6.
43. **RUMED.** (2017). Rumed: Rubarth Apparate Gmbh (toodete infoleht). Laatzten.
44. **Shea, A., Lawrence, M., Walker, P.** (2012). Hygrothermal performance of an experimental hemp-lime building. - Construction and building materials. / Vol. 36. ELSEVIER, lk. 270-275.
45. **Siska, A.** (2009). Looduslike soojustusmaterjalide omaduste uurimine puidust katsemajas. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu, lk 32-34.
46. **Smoljakova, K.** (2015). Tselluvill ja selle omadused ning kasutamise võimalused välispiirete soojustamisel. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu, lk 105-111.
47. **Steico.** (2010). Steico canaflex - Flexible thermal insulation from hemp (toote infoleht).
48. **Walker, R., Pavia, S.** (2014). Moisture transfer and thermal properties of hemp–lime concretes. - Construction and building materials. / Vol. 64. ELSEVIER, lk. 270-276.
49. **Vancouver Seed Bank.** (2014). [on-line] <http://vanseedbank.blogspot.com/2014/01/sativa-indica-or-ruderalis-whats.html>. (21.03.2017).
50. **Weed Homie.** (2017). [on-line] <http://weedhomie.com/cultivation/what-is-ruderalis/>. (21.03.2017).

# **SUMMARY**

## **STUDYING CHARACTERISTICS OF THERMAL INSULATION MATERIALS FROM INDUSTRIAL HEMP**

The environment that surrounds us is a system that is of vital importance to all mankind. We have to contribute to development and economizing in order to stop exhausting of this system. This concept is called sustainable development which means that the needs and aspirations of the present generation are contented for without putting in jeopardy the same interests of the following generations. Due to the growth of world population it is very important to develop new technologies and solutions that ensure our survival. But equally important is to learn more and more about the usage of renewable resources and to save and reuse non-renewable ones.

One of such renewable resources is hemp. This plant is able to grow in a very different climate and soil conditions therefore it is possible to make this plant to a local resource in many parts of the world. Within the growth period hemp binds large quantities of carbon dioxide thus helping to keep our environment cleaner. Hemp is a multifunctional plant which can be used in a very broad range of industries, including construction.

For thermal insulation of buildings, hemp wool is produced from hemp fiber, which is able to compete with synthetic wools. Hemp shiv can be used as a loose-fill insulation in a building envelope and it can be added as filler material in a lightweight concrete. Hemp concrete can be made with different ratio of components and mixes that have lowest density have very good thermal conductivity parameters. Hemp stalks can be used to make insulation panels that are suitable as an underlay material for clay or lime plasters and it has good thermal insulation properties. There are more possibilities for exploitation of hemp and some of them are still undergoing research.

The objective of this master's thesis was to provide an overview of hemp and its use in construction as well as in other industrial sectors. For this purpose literature has been studied which was used as a base for the first chapter of this research. A variety of experiments were conducted to determine the properties of hemp insulation materials. Several test methods and

standards that are in force in Estonia were used in this thesis. Therefore an overview has been provided about what and how to study in next researches.

Compressive strength tests confirmed already known fact that it is not possible to build load bearing structures from lightweight concrete with hemp shives. But insulating with this material helps to stiffen load bearing structure. Tests were carried out using three different test machines to determine compressive strength of hemp concretes at 10% strain. The compressive strength of test specimens from hemp concrete at 10% strain were ranging from 1,107 to 1,676 MPa. The strongest test specimens were MK4, which were made out of hemp shives, slaked lime and cement.

Hemp shiv can be used as a loose-fill insulation. To study settlement of hemp shives, impact excitation tests were carried out with a device that can produce 45 mm and 12 mm drop of the test wall. Compacted and not compacted hemp shives were used with both amplitudes of a test device. Settlement experiments show that compacted hemp shives are withstanding settlement well, but not compacted hemp shives are very prone to settlement.

Heat flow tests of hemp wool showed that methods for determining thermal conductivity in Estonian University of Life Sciences and Agricultural University of Latvia are reliable. To measure heat flow in Estonian University of Life Sciences climatic chamber Feutron 3007-5 was used and in Agricultural University of Latvia heat flow was measured with a test device HFM 436/3/1/E. Using those two methods for determining thermal conductivity showed difference of 0,002 W/mK (4%). The cause for such a difference might have been because of the modification of results using appropriate standards. Out of loose-fill and wool panel insulation materials tested in Estonian University of Life Sciences hemp wool had the lowest thermal conductivity of  $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}=0,047$  W/mK and with highest thermal conductivity were hemp shives which had thermal conductivity of  $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}=0,053$  W/mK. Out of hemp concrete specimens MK4 had the lowest thermal conductivity  $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}=0,097$  W/mK. This mix of hemp concrete contained 14% slaked lime, 6% cement and 80% hemp shives. MK5 had the highest thermal conductivity of  $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}=0,118$  W/mK. MK5 dry mass volume consisted of 20% clay and 80% hemp shives.

Adsorption test gave an overview of which hemp insulation materials adsorb moisture the most. To determine moisture content of test specimens at different relative humidity levels climatic chamber Rumed Type 3401 was used. Out of lightweight concrete specimens the least moisture was adsorbed by specimens MK5 and the most by MK2. Out of loose-fill insulations and wool panels hemp shives adsorbed the most and wood fibre panels absorbed least moisture from the air. Hence the conclusion that to use hemp shives as thermal insulation material it should be protected from moisture or its should be used in places where moisture is not a hazard.

In the future it would be necessary to examine more thoroughly hemp concrete properties. There are many different mixtures and this thesis studied only a small part of them. It is also necessary to examine the durability of hemp building materials. For example durability in cold cycles and persistence over time in a real building. As construction and production of materials from hemp is not particularly well known in Estonia it would be necessary to examine the cost of building with hemp in current conditions of the construction industry.



**LISAD**

## Lisa 1 — Survetugevuse katsete tulemused

**Tabel L.1.1.** Survetugevuse katsekehade andmed

Katsekeha nimetus	Pikkus [mm]	Laius [mm]	Kõrgus [mm]	Ruumala [m <sup>3</sup> ]	Kaal [g]	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]	Keskmine tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]	Vee- sisaldus [%]
MK1-1	147,0	150,5	148,8	0,00329	1624,0	493,13	502	10,20
MK1-2	147,3	148,4	150,2	0,00328	1625,5	495,30		10,12
MK1-3	148,6	148,9	149,5	0,00331	1666,1	503,65		10,51
MK1-4	148,2	148,2	148,6	0,00326	1679,4	514,66		10,07
MK1-5	149,0	148,2	150,6	0,00332	1673,8	503,41		10,35
MK1-6	149,2	150,7	146,0	0,00328	1637,6	498,90		10,15
MK2-1	147,9	148,9	148,9	0,00328	1842,5	561,84	555	11,09
MK2-2	148,2	148,8	147,6	0,00325	1773,3	544,87		11,05
MK2-3	148,4	148,4	147,2	0,00324	1808,8	557,82		10,89
MK2-4	146,9	148,7	148,9	0,00325	1829,1	562,46		12,08
MK2-5	148,1	149,5	147,6	0,00327	1759,9	538,29		10,97
MK2-6	148,5	148,2	148,8	0,00327	1845,2	563,48		10,99
MK3-1	147,9	150,2	149,4	0,00332	2436,4	733,67	724	11,57
MK3-2	149,6	151,6	148,3	0,00336	2445,2	727,20		11,40
MK3-3	147,5	150,7	149,2	0,00332	2308,1	696,00		10,99
MK3-4	148,3	151,4	148,6	0,00334	2412,9	722,93		10,69
MK3-5	149,4	151,3	148,0	0,00335	2484,2	742,47		10,48
MK4-1	148,9	148,4	148,4	0,00328	2098,3	639,65	628	8,68
MK4-2	149,4	148,0	148,1	0,00328	2080,5	635,27		7,14
MK4-3	149,5	148,9	149,2	0,00332	2019,1	607,60		6,87
MK5-1	147,3	147,3	148,4	0,00322	1876,4	583,08	568	2,87
MK5-2	147,6	146,9	148,9	0,00323	1816,2	562,69		3,48
MK5-3	147,1	147,5	147,2	0,00319	1786,0	559,30		2,83

Märkus. Tiheduse veerus on märgitud kuivatamata materjali mahukaal.

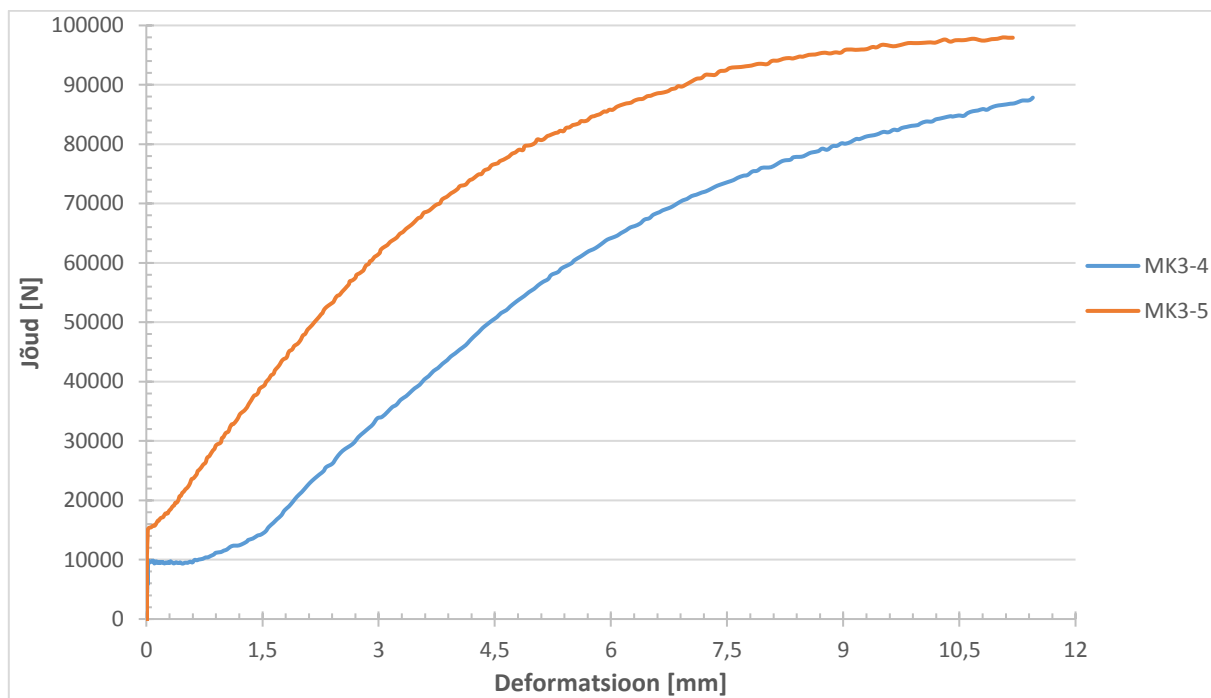
**Tabel L.1.2.** Kanepiluu kergbetoonist katsekehade survetugevuse mõõtmiste andmed.

Kergbetooni segude koostised on toodud tabelis 4.2

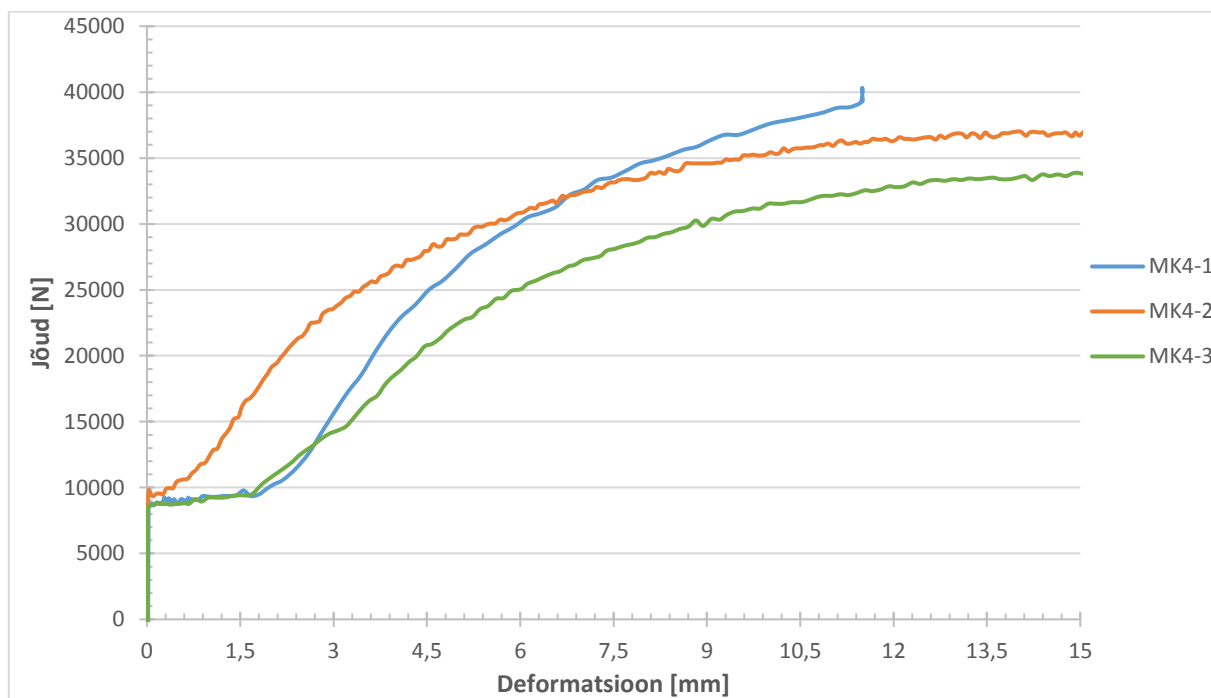
Katsekeha nimetus	Survepind [mm <sup>2</sup> ]	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]	Survejõud F <sub>10%</sub> [N]	Survetugevus [MPa]	Keskmine survetugevus [Mpa]	Survekatsemasin
MK1-1	21883,5	493,13	24362	1,113	1,107	ПСУ-10
MK1-2	22068,9	495,30	22073	1,000		ПСУ-10
MK1-3	22228,6	503,65	25833	1,162		ПСУ-10
MK1-4	21951,1	514,66	24198	1,102		ПСУ-10
MK1-5	21852,0	503,41	25179	1,152		ПСУ-10
MK1-6	21711,8	498,90	24198	1,115		ПСУ-10
MK2-1	21699,8	561,84	33681	1,552	1,457	ПСУ-10
MK2-2	21732,1	544,87	30248	1,392		ПСУ-10
MK2-3	21709,0	557,82	31065	1,431		ПСУ-10
MK2-4	21574,5	562,46	32046	1,485		ПСУ-10
MK2-5	21714,1	538,29	28449	1,310		ПСУ-10
MK2-6	21859,6	563,48	34335	1,571		ПСУ-10
MK3-1	21893,5	733,67	100000	4,568	4,239	ПСУ-10
MK3-2	22119,9	727,20	95000	4,295		П-50
MK3-3	21927,3	696,00	85000	3,876		П-50
MK3-4*	21884,3	722,93	<b>87833</b>	<b>4,014</b>		П-125
MK3-5*	22030,7	742,47	<b>97928</b>	<b>4,445</b>		П-125
MK4-1*	22058,1	639,65	<b>40304</b>	<b>1,827</b>	1,676	П-125
MK4-2	22053,5	635,27	<b>36999</b>	<b>1,678</b>		П-125
MK4-3	22198,8	607,60	<b>33815</b>	<b>1,523</b>		П-125
MK5-1	21779,6	583,08	<b>34115</b>	<b>1,566</b>	1,439	П-125
MK5-2	21872,9	562,69	<b>30209</b>	<b>1,381</b>		П-125
MK5-3	21548,0	559,30	<b>29488</b>	<b>1,368</b>		П-125

Märkused:

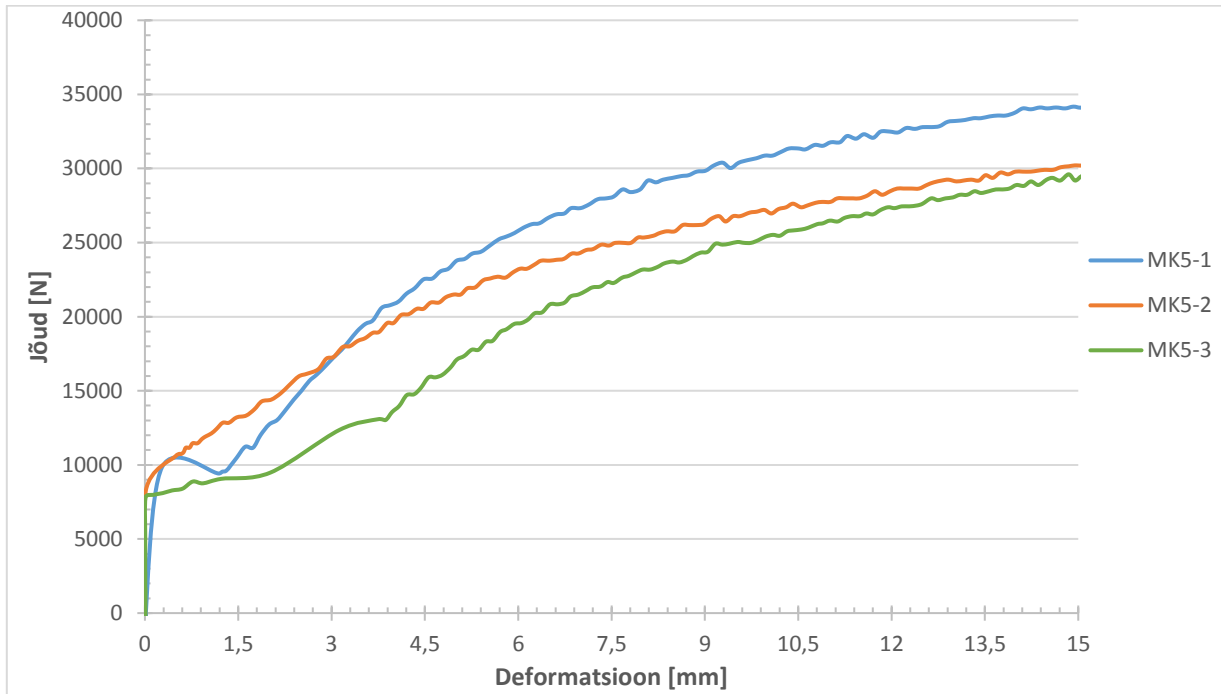
- Tumedas kirjas survejõud ja survetugevus on määratud täpselt katsekeha 10% deformatsioonil. Ülejäänud katsekehade puhul on survetugevus umbkaudselt 10% deformatsioonil (vaata peatükki 2.2).
- Katsekehad MK3-4, MK3-5 ja MK4-1 mõjus maksimaalne jõud enne 10% deformatsiooni, mis fikseeriti katsekeha survetugevuseks.



Joonis L.1.1. MK3 katsekehade surge-deformatsiooni graafik

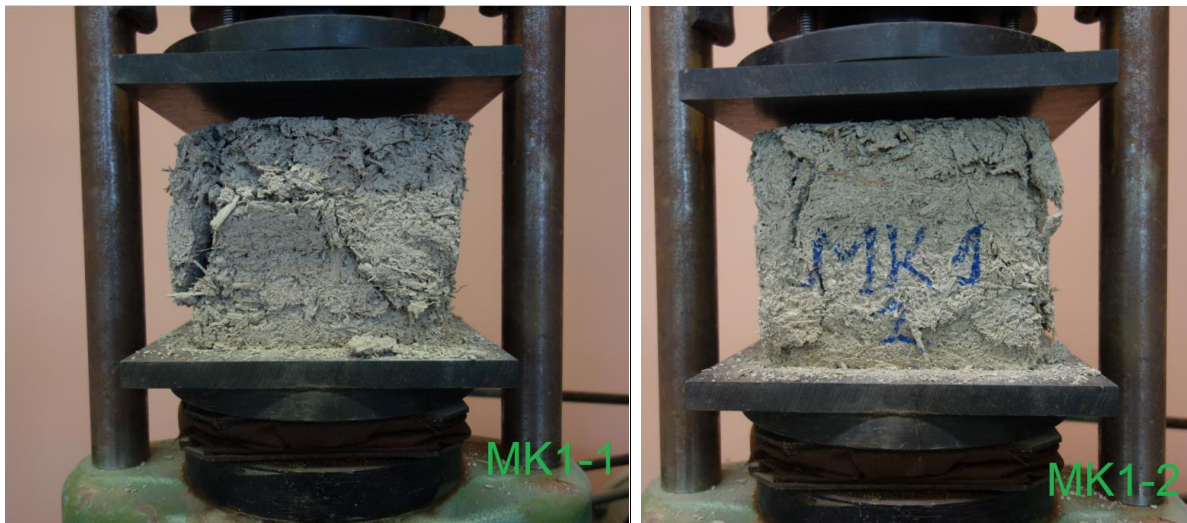


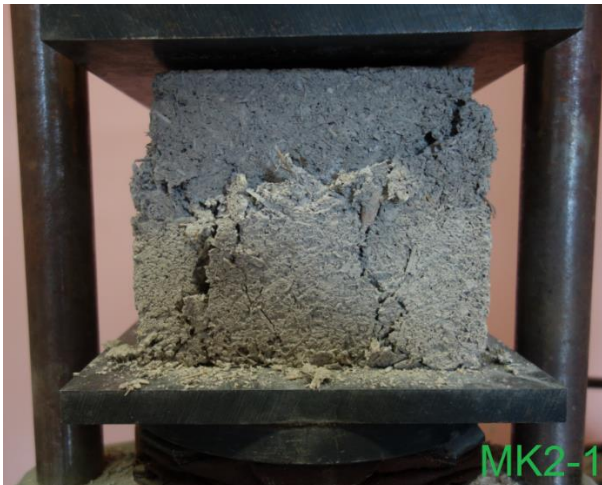
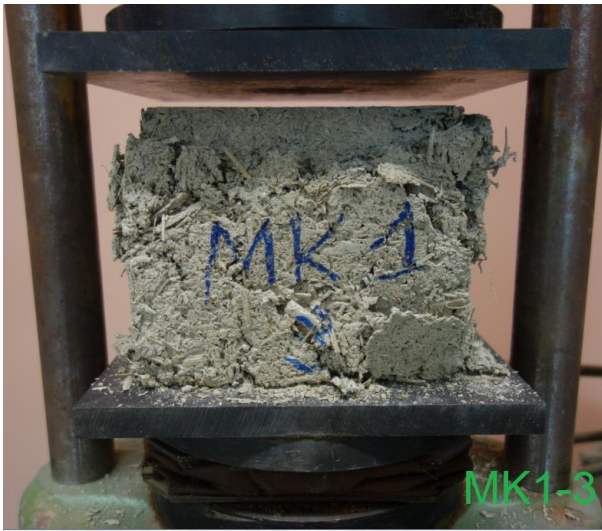
Joonis L.1.2. MK4 katsekehade surge-deformatsiooni graafik



Joonis L.1.3. MK5 katsekehade surve-deformatsiooni graafik

Joonis L.1.4. Survetugevuse katsekehade purunemispildid









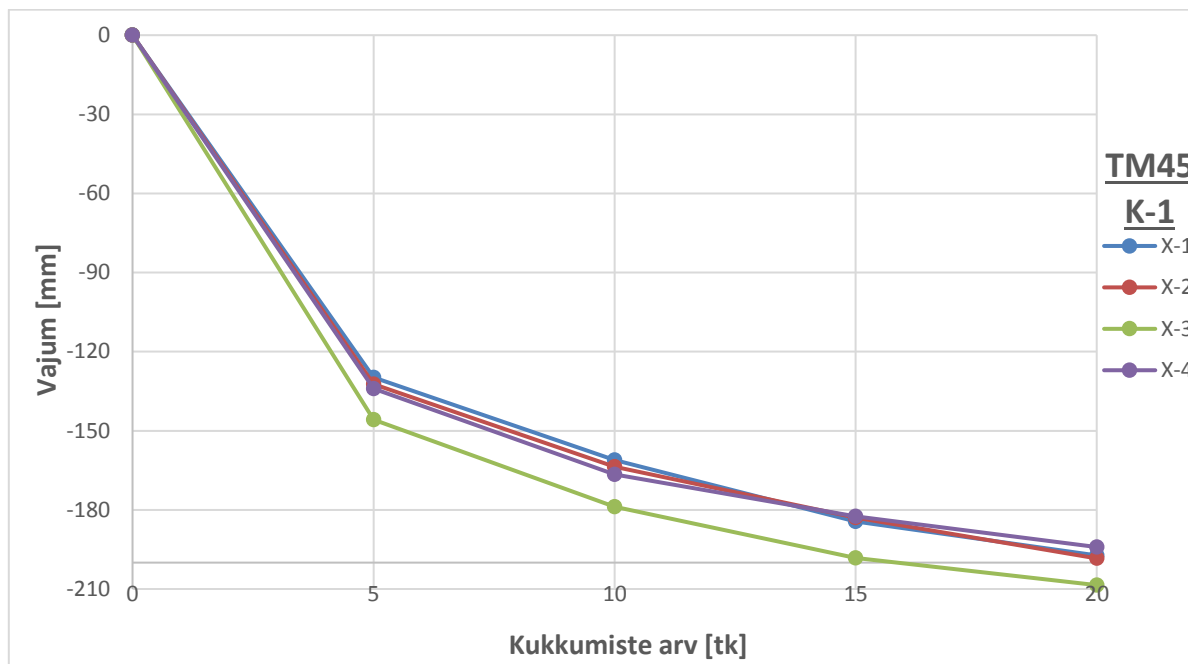




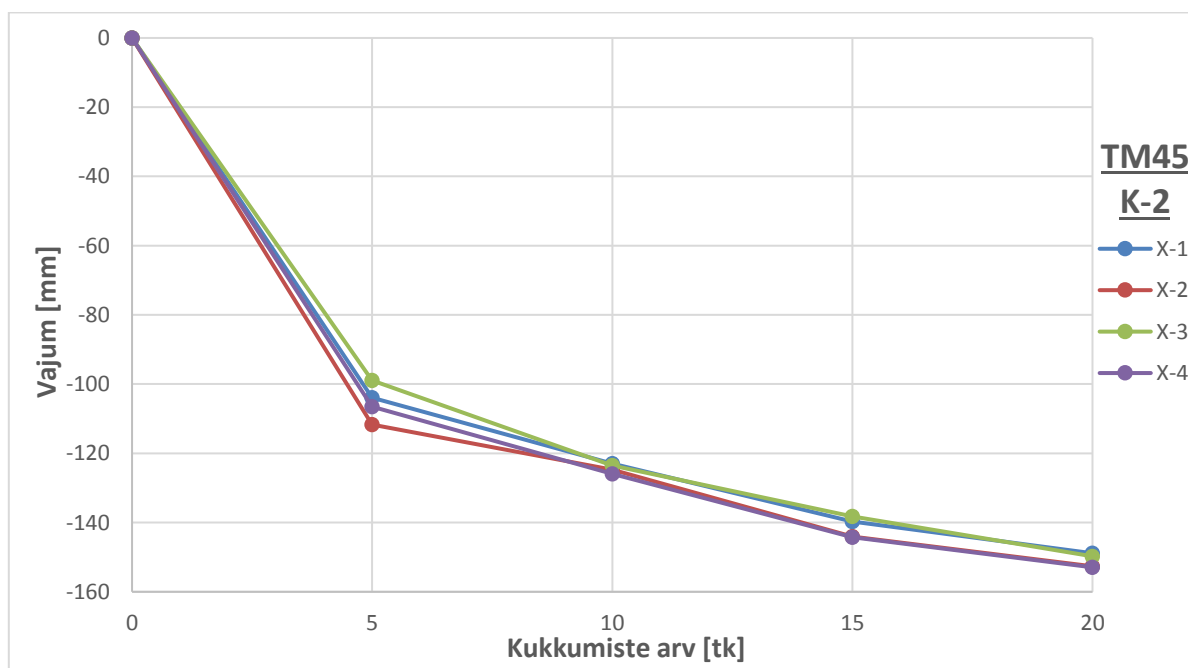




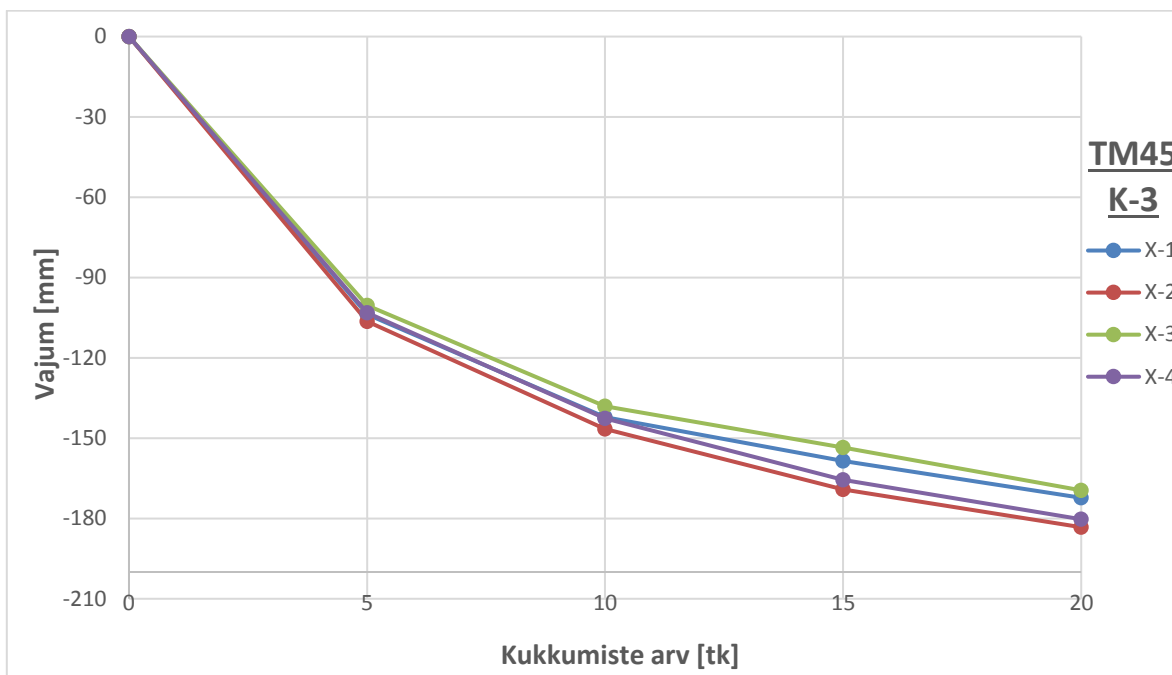
## Lisa 2 — Kanepiluu vajumiskatse mõõtmispunktide vajumise graafikud



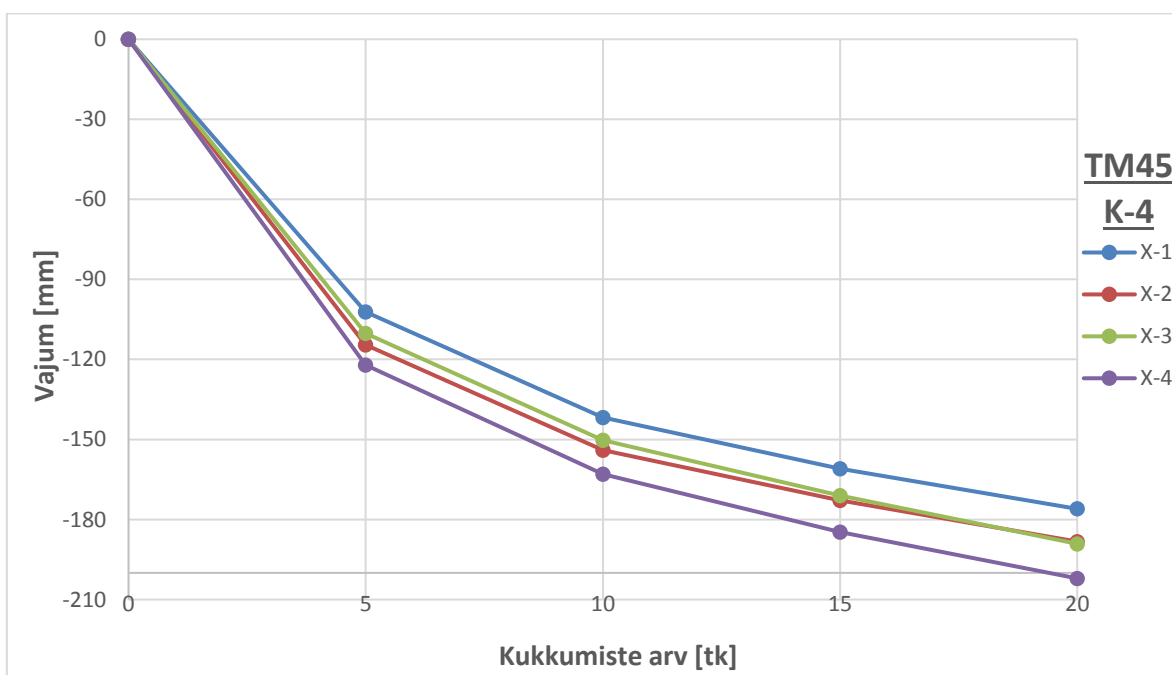
**Joonis L.2.1.** Katseseina K-1 mõõtmispunktide X-1...X-4 vajumid tihendamata kanepiluuga ja 45 mm amplituudise katse korral



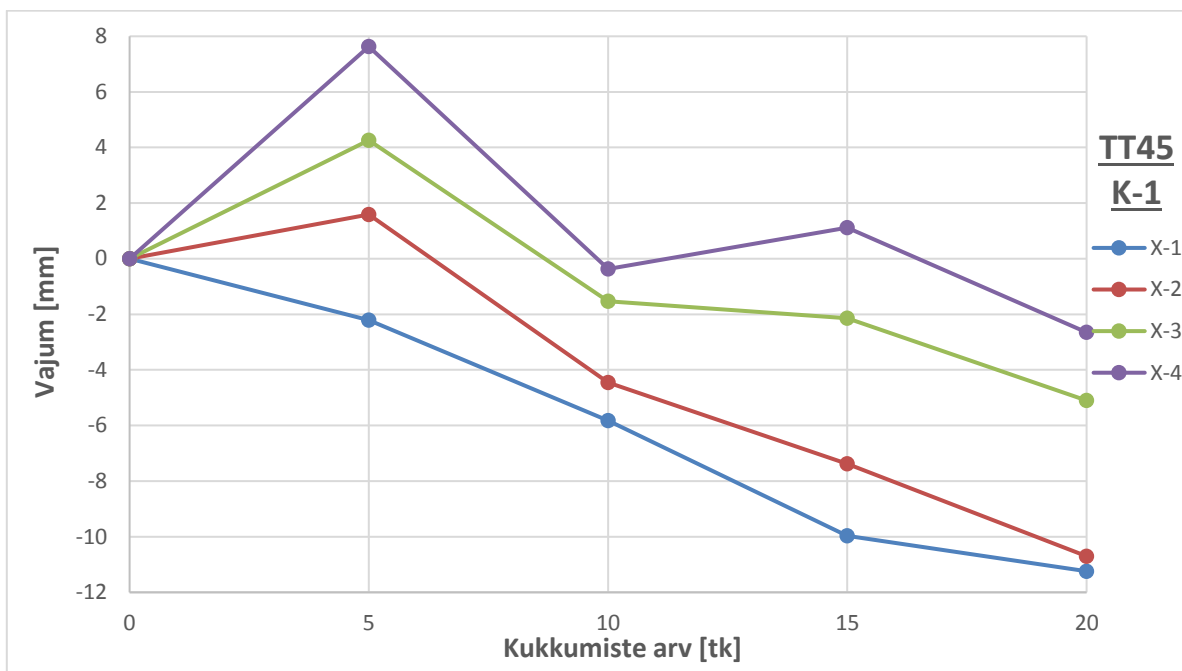
**Joonis L.2.2.** Katseseina K-2 mõõtmispunktide X-1...X-4 vajumid tihendamata kanepiluuga ja 45 mm amplituudise katse korral



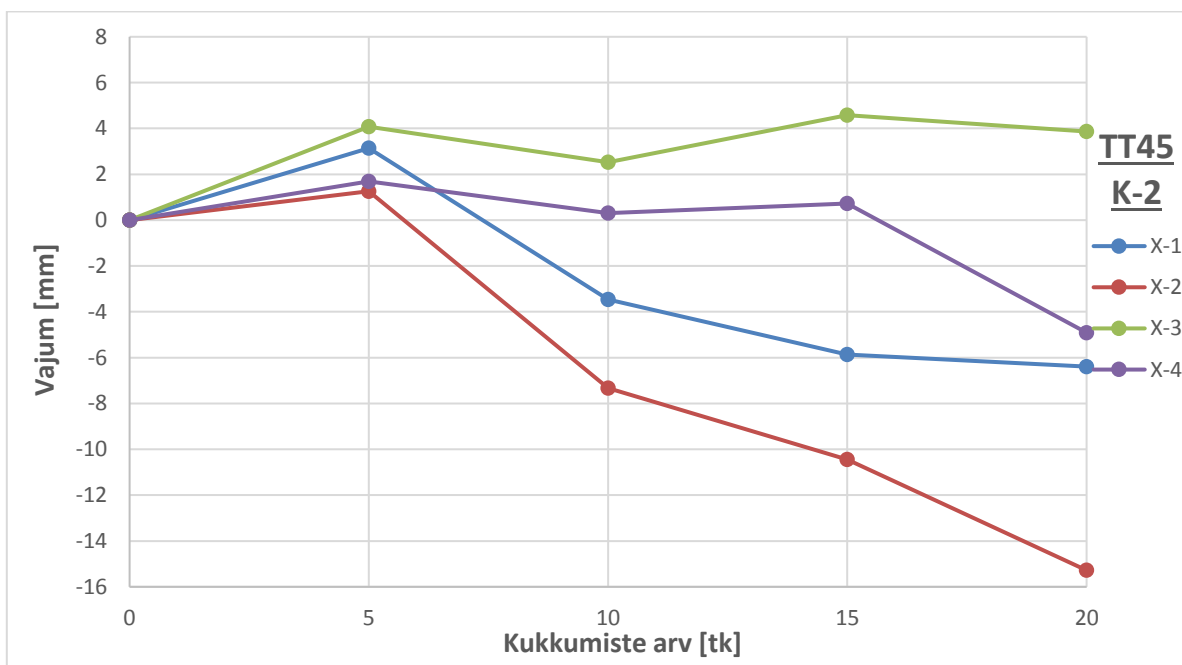
**Joonis L.2.3.** Katseseina K-3 mõõtmispunktide X-1...X-4 vajumid tihendamata kanepiluuga ja 45 mm amplituudise katse korral



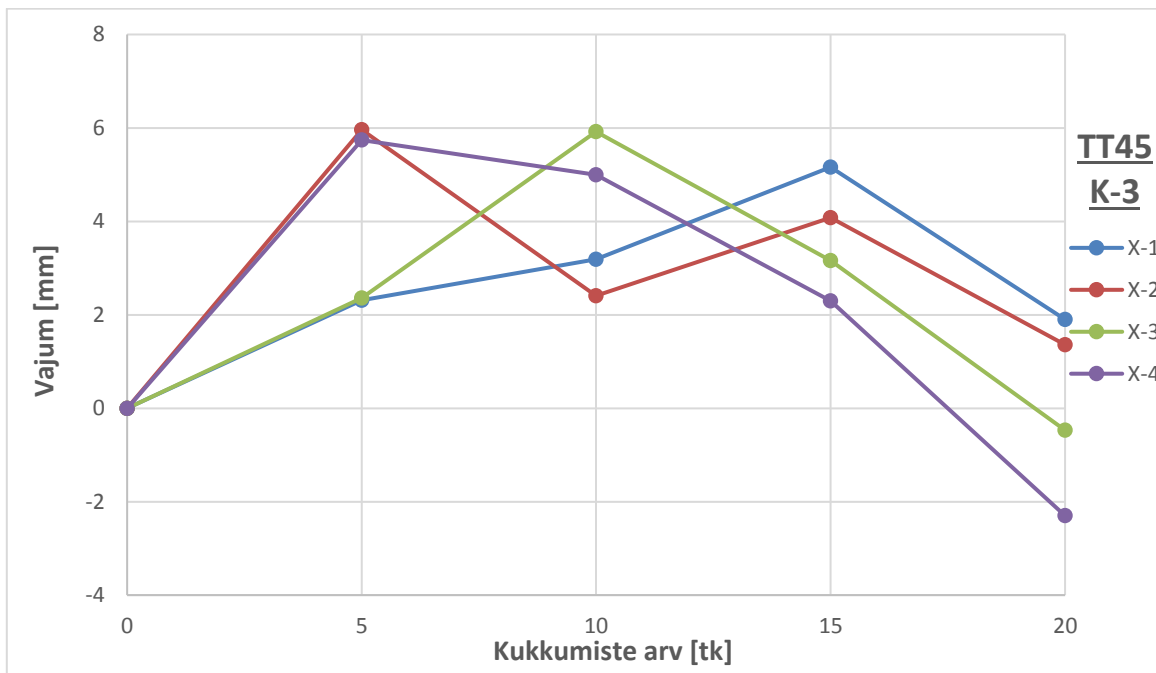
**Joonis L.2.4.** Katseseina K-4 mõõtmispunktide X-1...X-4 vajumid tihendamata kanepiluuga ja 45 mm amplituudise katse korral



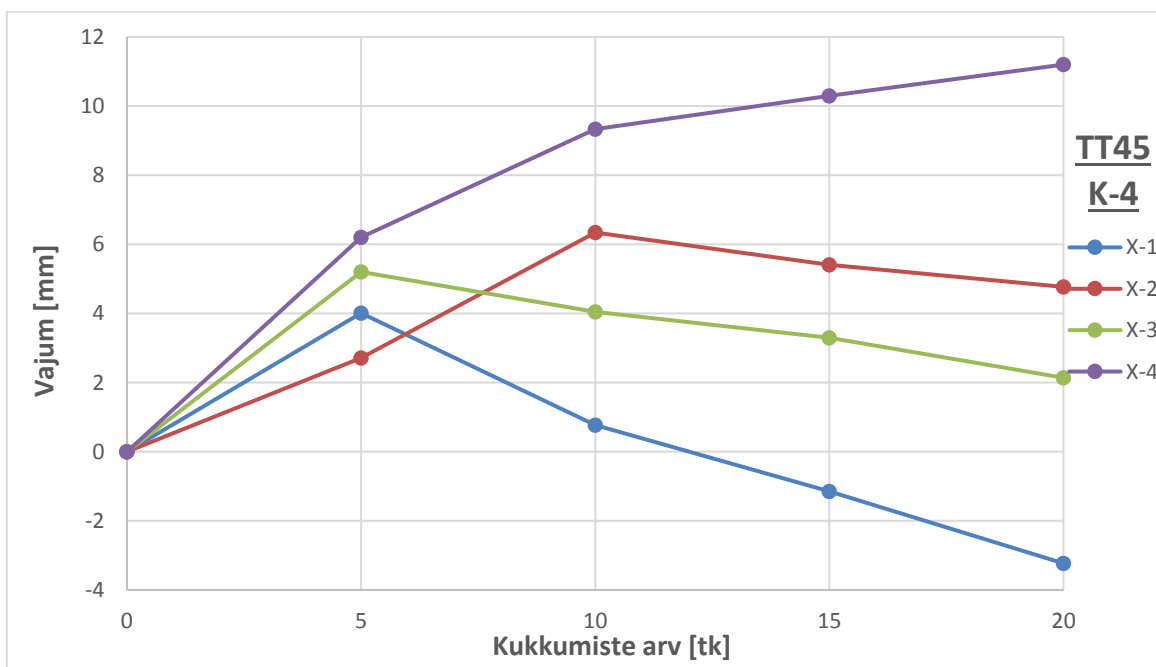
**Joonis L.2.5.** Katseseina K-1 mõõtmispunktide X-1...X-4 vajumid tihendatud kanepiluuga ja 45 mm amplituudise katse korral



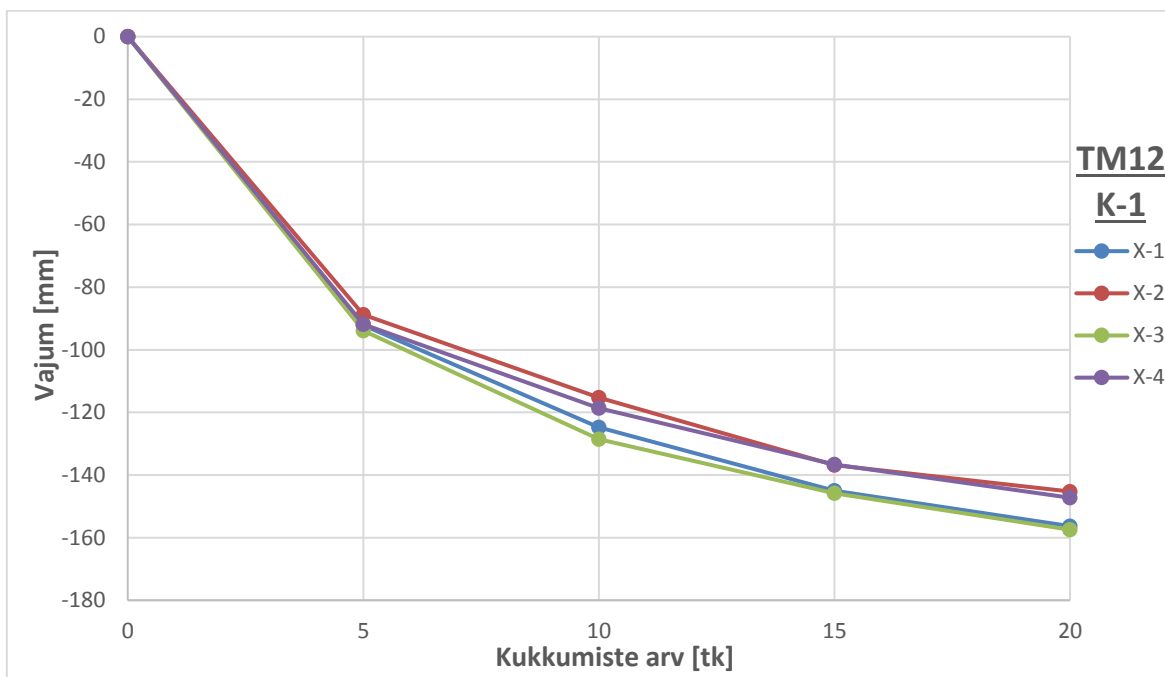
**Joonis L.2.6.** Katseseina K-2 mõõtmispunktide X-1...X-4 vajumid tihendatud kanepiluuga ja 45 mm amplituudise katse korral



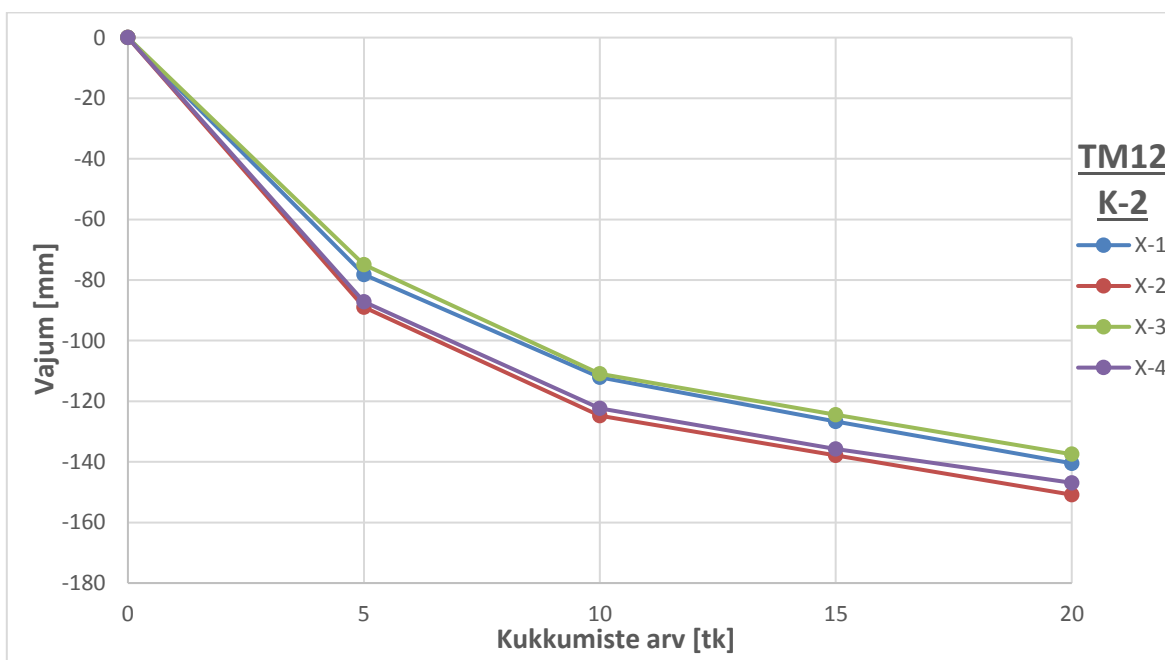
**Joonis L.2.7.** Katseseina K-3 mõõtmispunktide X-1...X-4 vajumid tihendatud kanepiluuga ja 45 mm amplituudise katse korral



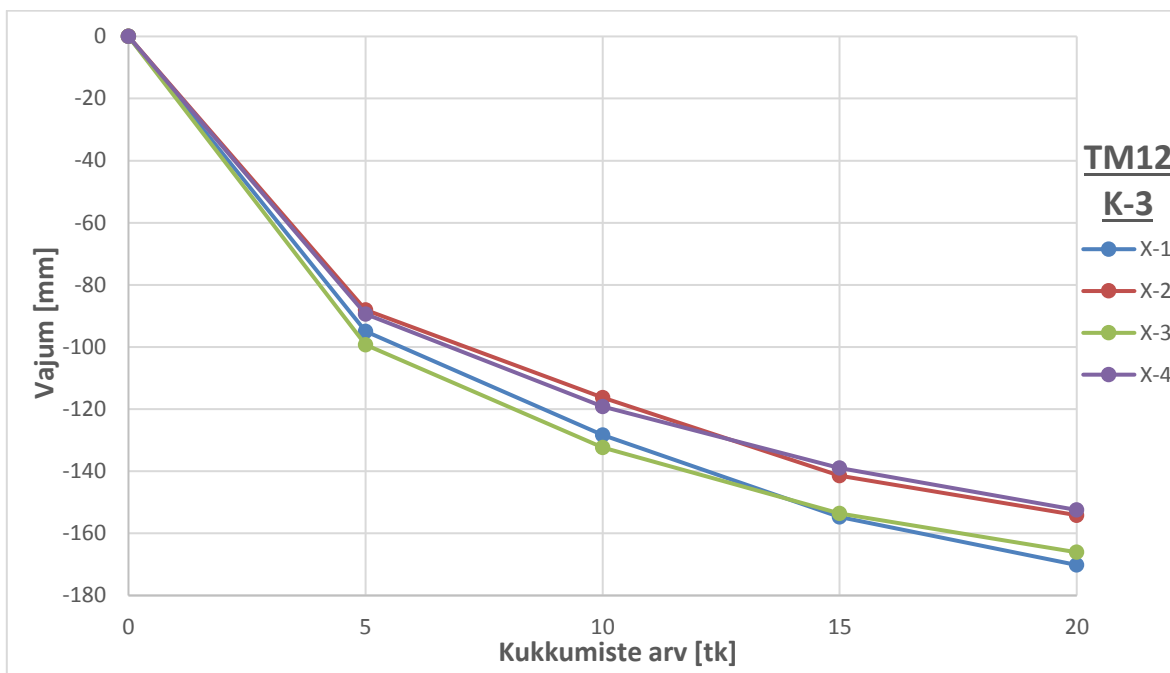
**Joonis L.2.8.** Katseseina K-4 mõõtmispunktide X-1...X-4 vajumid tihendatud kanepiluuga ja 45 mm amplituudise katse korral



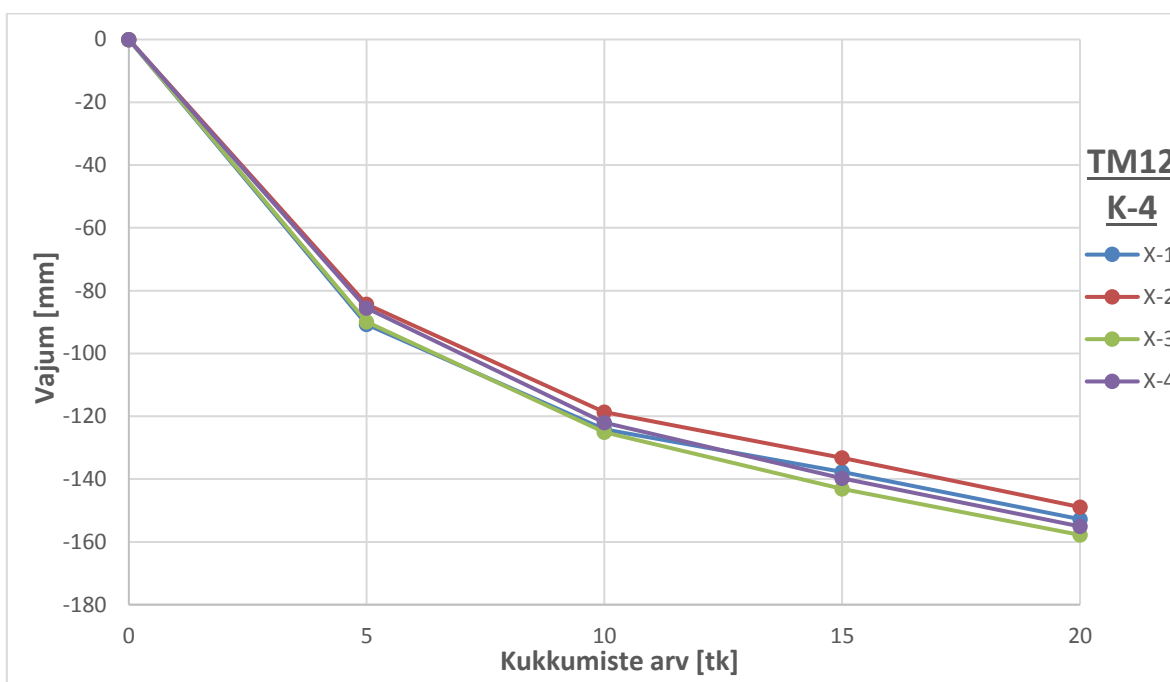
**Joonis L.2.9.** Katseseina K-1 mõõtmispunktide X-1...X-4 vajumid tihendamata kanepiluuga ja 12 mm amplituudise katse korral



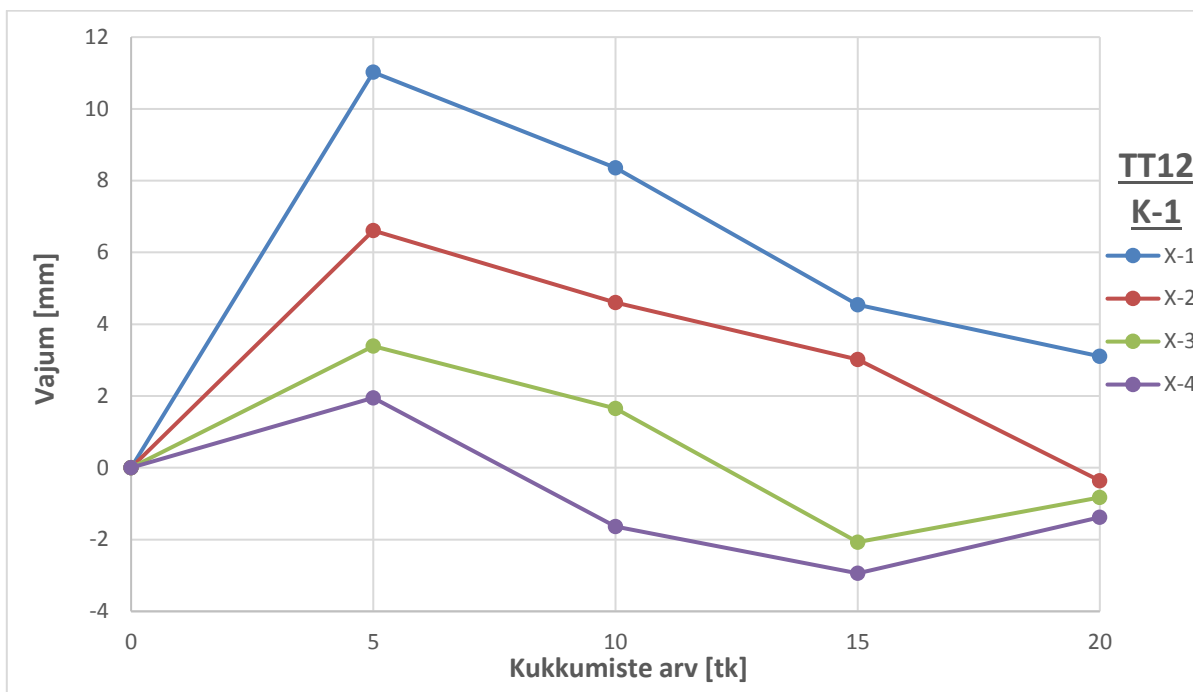
**Joonis L.2.10.** Katseseina K-2 mõõtmispunktide X-1...X-4 vajumid tihendamata kanepiluuga ja 12 mm amplituudise katse korral



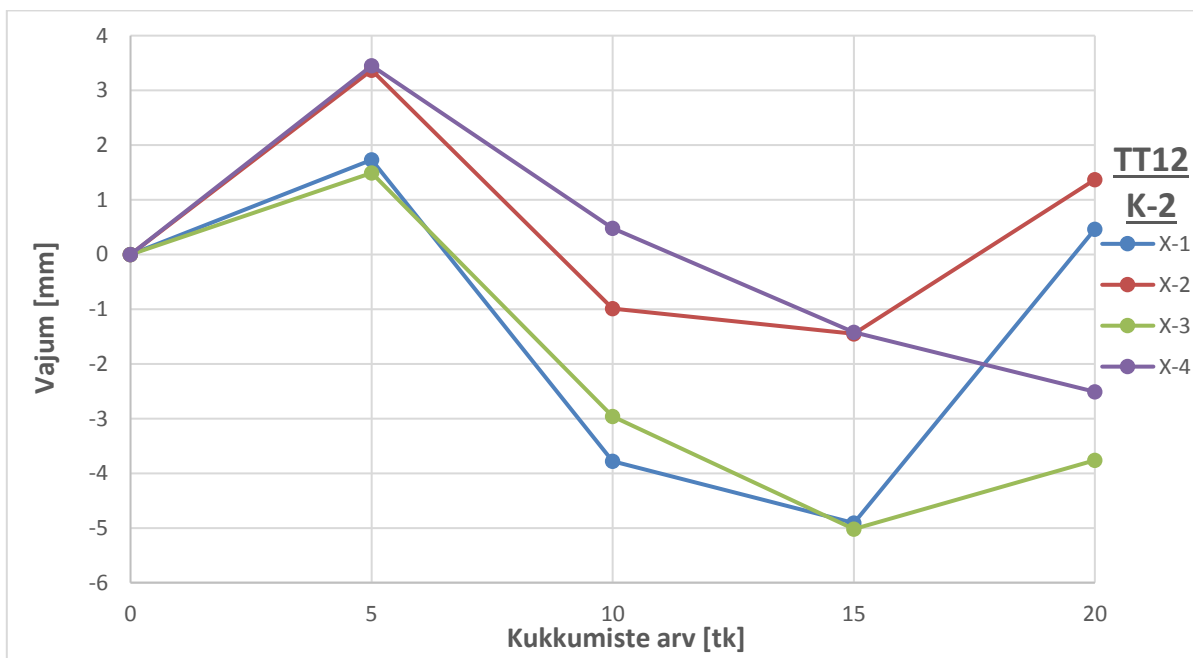
**Joonis L.2.11.** Katseseina K-3 mõõtmispunktide X-1...X-4 vajumid tihendamata kanepiluuga ja 12 mm amplituudise katse korral



**Joonis L.2.12.** Katseseina K-4 mõõtmispunktide X-1...X-4 vajumid tihendamata kanepiluuga ja 12 mm amplituudise katse korral

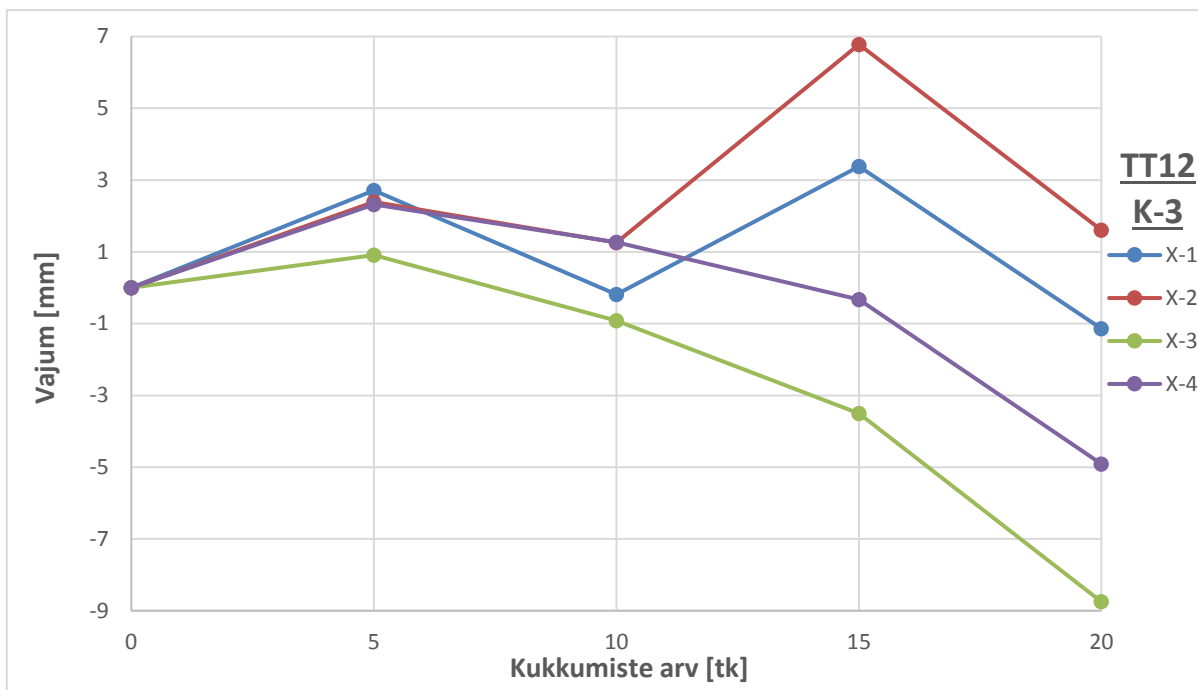


**Joonis L.2.13.** Katseseina K-1 mõõtmispunktide X-1...X-4 vajumid tihendatud kanepiluuga ja 12 mm amplituudise katse korral

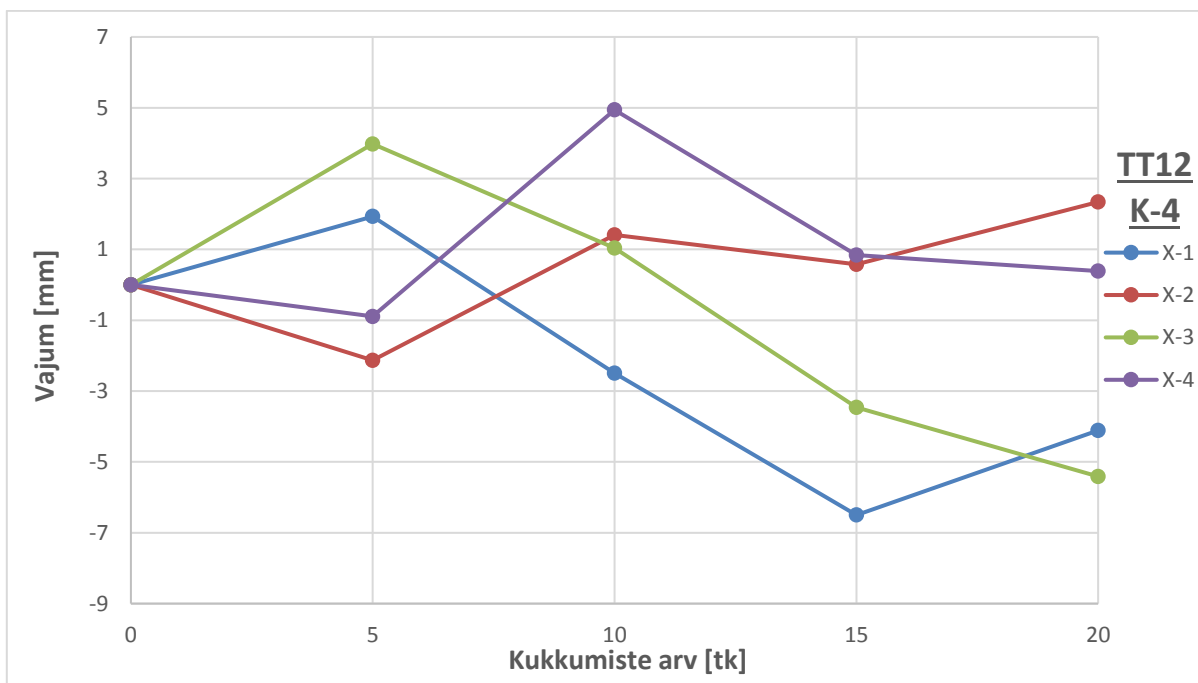


**Joonis L.2.14.** Katseseina K-2 mõõtmispunktide X-1...X-4 vajumid tihendatud kanepiluuga ja 12 mm amplituudise katse korral





**Joonis L.2.15.** Katseseina K-3 mõõtmispunktide X-1...X-4 vajumid tihendatud kanepiluuga ja 12 mm amplituudise katse korral



**Joonis L.2.16.** Katseseina K-4 mõõtmispunktide X-1...X-4 vajumid tihendatud kanepiluuga ja 12 mm amplituudise katse korral

### Lisa 3 — Kanepivilla soojusvoo katse Läti Põllumajandusülikoolis

**Tabel L.3.1.** Läti Põllumajandusülikoolis (LPÜ) uuritud kanepivillaplaatidest (KVP)

katsekehade omadused

Katsekeha	Katsekehade mõõtmed [mm]			Mass [g]	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]
	A	B	H		
KVP-1 LPÜ	300,00	300,00	49,96	299,6	66,64
KVP-2 LPÜ	300,00	300,00	49,70	314,3	70,26
KVP-3 LPÜ	300,00	300,00	50,96	306,1	66,74

Märkus. Tabelis on toodud kuivatamata materjali tihedus.

**Tabel L.3.2.** Soojuserijuhtivuse teisendamine deklareeritavatele temperatuuridele

Katsekeha	Keskmine temperatuur [C°]	f <sub>T</sub>	F <sub>T-10°C</sub> [1/K]	λ [W/mK]	λ <sub>10°C</sub> [W/mK]	Keskm. λ <sub>10°C</sub> [W/mK]	Standard-hälve Sd(λ)
KVP-1 LPÜ	10,23	0,0035	0,9992	0,045	0,051	0,049	0,001302
KVP-2 LPÜ	10,00	0,0035	1,0000	0,044	0,049		
KVP-3 LPÜ	10,53	0,0035	0,9981	0,043	0,048		

**Tabel L.3.3.** Kanepivilla katseandmed seadmest HFM 436/3/1/E Lambda

Katse-keha	Katse algus	Tsükli number	Tsükli kestvus [h:min:sek]	Keskmine temp. [C°]	Temp. vahe ΔT [C°]	λ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> *K/W]	Temp. gradient [K/m]
KVP-1 LPÜ	1.12.2016 16:09	1	1:55:52	10,23	20,43	0,045	1,1027	409,00
KVP-2 LPÜ	2.12.2016 5:03	1	2:46:17	50,33	20,17	0,052	0,9627	405,89
		2	1:55:35	30,05	20	0,047	1,0519	402,59
		3	1:41:31	19,94	19,99	0,045	1,0937	402,25
		4	1:41:31	10,02	19,98	0,044	1,1400	402,05
		5	0:23:07	10	19,98	0,044	1,1414	402,11
		6	1:55:36	-0,64	19,98	0,042	1,1929	402,04
		7	2:03:38	-10,23	19,99	0,040	1,2508	402,31
KVP-3 LPÜ	5.12.2016 8:21	1	1:22:46	29,89	20,07	0,051	1,0068	393,95
		2	1:27:27	50,03	20,06	0,052	0,9752	393,65
		3	1:22:25	40,89	20,04	0,048	1,0632	393,26
		4	2:16:42	19,19	19,98	0,044	1,1532	392,13
		5	1:21:25	10,53	19,9	0,043	1,1916	390,53
		6	2:03:38	-0,83	19,95	0,041	1,2509	391,47
		7	2:14:41	-10,29	19,99	0,039	1,3120	392,20
		8	2:54:54	29,99	20,02	0,047	1,0880	392,82

## Lisa 4 — Soojusvoo katsed Eesti Maaülikoolis

**Tabel L.4.1.** Soojuserijuhtivuse katsekehade kuivatamine. Kergbetooni segude koostised on toodud tabelis 4.2

Nr.	Tähis	Katsekeha (paksus mm)	Kliimakambri mõõtmine		Katsekehade mass			Vee- sisaldus
					Kliimakamber	Kuivatuskapp		
			algus	lõpp	mn [g]	mk [g]	t [°C]	Wk [%]
Villa plaadid								
1.	KVP-1	Kanepivillaplaat 1 (50+50)	23.01.17 17:21	25.01.17 22:39	615,30	576,30	105	6,77
2.	KVP-2	Kanepivillaplaat 2 (50+50)	25.01.17 22:54	28.01.17 21:29	598,54	563,23	105	6,27
3.	KVP-3	Kanepivillaplaat 3 (50+50)	28.01.17 21:44	30.01.17 17:12	627,78	587,29	105	6,89
4.	PVP-1	Puitvillaplaat 1 (40+40)	30.01.17 17:32	2.02.17 15:36	470,10	435,48	105	7,95
5.	PVP-2	Puitvillaplaat 2 (40+40)	2.02.17 15:55	6.02.17 14:51	461,17	432,20	105	6,70
Puistematerjal								
6.	PV-1	Puitvill 1 (100)	6.02.17 15:58	8.02.17 0:09	871,49	815,41	105	6,88
7.	PV-2	Puitvill 2 (100)	8.02.17 0:44	9.02.17 16:31	401,84	372,75	105	7,80
8.	PV-3	Puitvill 3 (100)	9.02.17 19:34	11.02.17 8:29	403,95	363,16	105	11,23
9.	PV-4	Puitvill 4 (100)	11.02.17 8:50	12.02.17 20:41	401,66	368,80	105	8,91
10.	KL-1	Kanepiluu 1 (100)	19.03.17 19:00	22.03.17 19:57	970,40	870,50	105	11,48
11.	KL-2	Kanepiluu 2 (100)	22.03.17 20:27	25.03.17 16:08	1042,30	935,20	105	11,45
12.	KL-3	Kanepiluu 3 (100)	25.03.17 16:22	29.03.17 18:39	1046,20	946,40	105	10,55
Kergbetoonid								
13.	MK1-1	Kergbetoon (100)	12.02.17 21:11	14.02.17 19:25	4963,60	4425,40	105	12,16
14.	MK1-2	Kergbetoon (100)	14.02.17 19:56	16.02.17 16:44	4900,00	4311,60	105	13,65
15.	MK2-1	Kergbetoon (100)	16.02.17 13:08	19.02.17 13:08	5087,90	4552,90	105	11,75
16.	MK2-2	Kergbetoon (100)	19.02.17 13:29	21.02.17 15:04	5364,10	4752,90	105	12,86
17.	MK4-1	Kergbetoon (100)	27.02.17 18:13	3.03.17 18:47	3658,30	3352,40	105	9,12
18.	MK4-2	Kergbetoon (100)	6.03.17 13:40	8.03.17 17:21	3464,00	3182,20	105	8,86
19.	MK4-3	Kergbetoon (100)	8.03.17 18:19	10.03.17 15:51	4582,90	4189,40	105	9,39
20.	MK5-1	Kergbetoon (100)	10.03.17 17:20	12.03.17 20:16	4412,20	4276,20	105	3,18
21.	MK5-2	Kergbetoon (100)	12.03.17 20:47	14.03.17 21:51	4468,10	4336,50	105	3,03
22.	MK5-3	Kergbetoon (100)	14.03.17 22:13	19.03.17 18:43	4226,80	4099,60	105	3,10

**Tabel L.4.2.** Soojuserijuhtivuse katsekehade andmed. Kergbetooni segude koostised on toodud tabelis 4.2

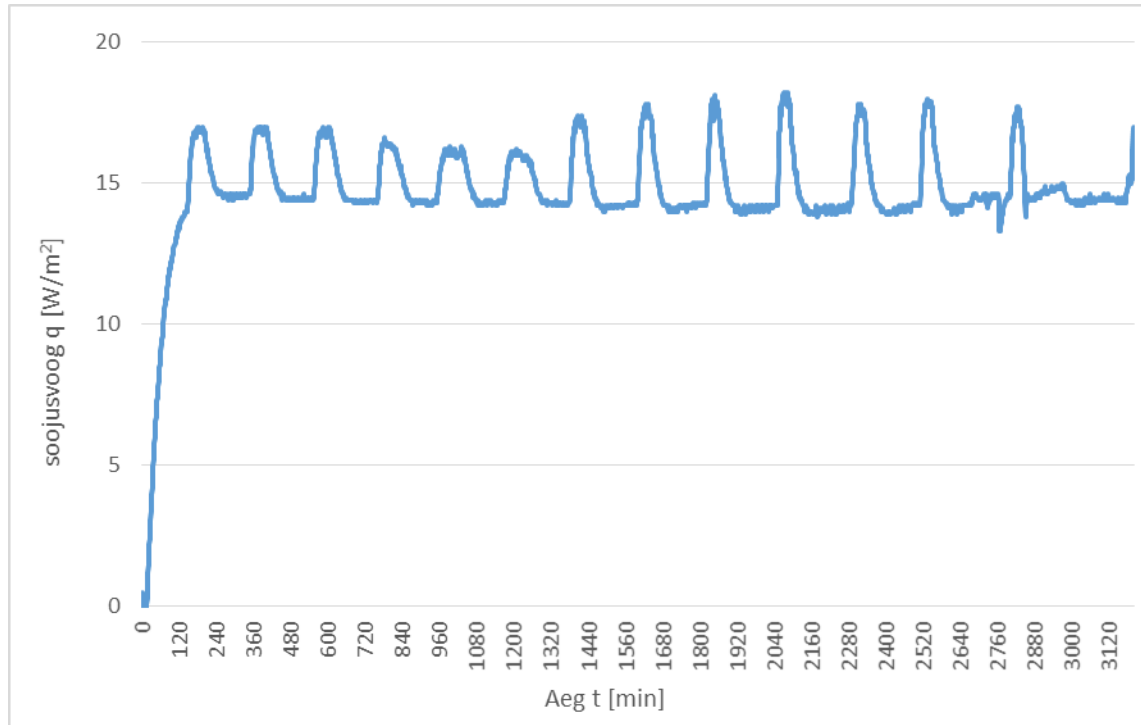
Nr	Tähis	Katsekeha (paksus mm)	Ruumala	Tihedus	Keskm. tihedus	Stabiilse löigu keskmised temperatuurid			Standardhälve
			V	ρ	ρ	θvälispind	θsisepind	θkeskmine	s <sub>λ</sub>
			m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	θ <sub>2</sub> [°C]	θ <sub>1</sub> [°C]	T <sub>1</sub> [°C]	
Villa plaadid									
1.	KVP-1	Kanepivillaplaat 1 (50+50)	0,00852	72,3	71,9	-15,2	16,7	0,7	0,0006
2.	KVP-2	Kanepivillaplaat 2 (50+50)	0,00836	71,6		-14,9	16,3	0,7	
3.	KVP-3	Kanepivillaplaat 3 (50+50)	0,00874	71,8		-14,8	16,3	0,8	
4.	PVP-1	Puitivillaplaat 1 (40+40)	0,00673	69,9	69,1	-15,5	12,2	-1,6	0,0011
5.	PVP-2	Puitivillaplaat 2 (40+40)	0,00675	68,3		-15,5	13,4	-1,0	
Puistematerjal									
6.	PV-1*	Puitvill 1 (100)	0,00855	101,9	*	-15,1	16,4	0,7	0,0001
7.	PV-2	Puitvill 2 (100)	0,00855	47,0	47,1	-15,1	16,7	0,8	
8.	PV-3	Puitvill 3 (100)	0,00855	47,2		-15,1	16,7	0,8	
9.	PV-4	Puitvill 4 (100)	0,00855	47,0		-15,1	16,7	0,8	
10.	KL-1	Kanepiluu 1 (100)	0,00855	113,5	119,3	-16,0	16,1	0,1	0,0012
11.	KL-2	Kanepiluu 2 (100)	0,00855	121,9		-16,7	15,8	-0,5	
12.	KL-3	Kanepiluu 3 (100)	0,00855	122,4		-17,2	15,8	-0,7	
Kergbetoonid									
13.	MK1-1	Kergbetoon (100)	0,00926	535,9	531,4	-14,3	13,7	-0,3	0,00005
14.	MK1-2	Kergbetoon (100)	0,00930	526,8		-14,2	14,6	0,2	
15.	MK2-1	Kergbetoon (100)	0,00922	551,8	559,6	-14,1	13,6	-0,3	0,0011
16.	MK2-2	Kergbetoon (100)	0,00945	567,5		-14,0	13,8	-0,1	
17.	MK4-1	Kergbetoon (100)	0,00865	423,0	413,2	-17,5	12,9	-2,3	0,0017
18.	MK4-2	Kergbetoon (100)	0,00859	403,4		-18,2	13,5	-2,4	
19.	MK4-3*	Kergbetoon (100)	0,00809	566,3	*	-14,7	12,7	-1,0	
20.	MK5-1	Kergbetoon (100)	0,00876	503,6	513,2	-15,4	12,7	-1,3	0,0010
21.	MK5-2	Kergbetoon (100)	0,00833	536,3		-15,1	12,3	-1,4	
22.	MK5-3	Kergbetoon (100)	0,00846	499,6		-13,1	13,8	0,1	

\* Katsekeha tihedus liiga suure erinevusega teistest samas seerias olevatest katsekehadest. Kõigist keskmiste arvutustest välja jäetud.

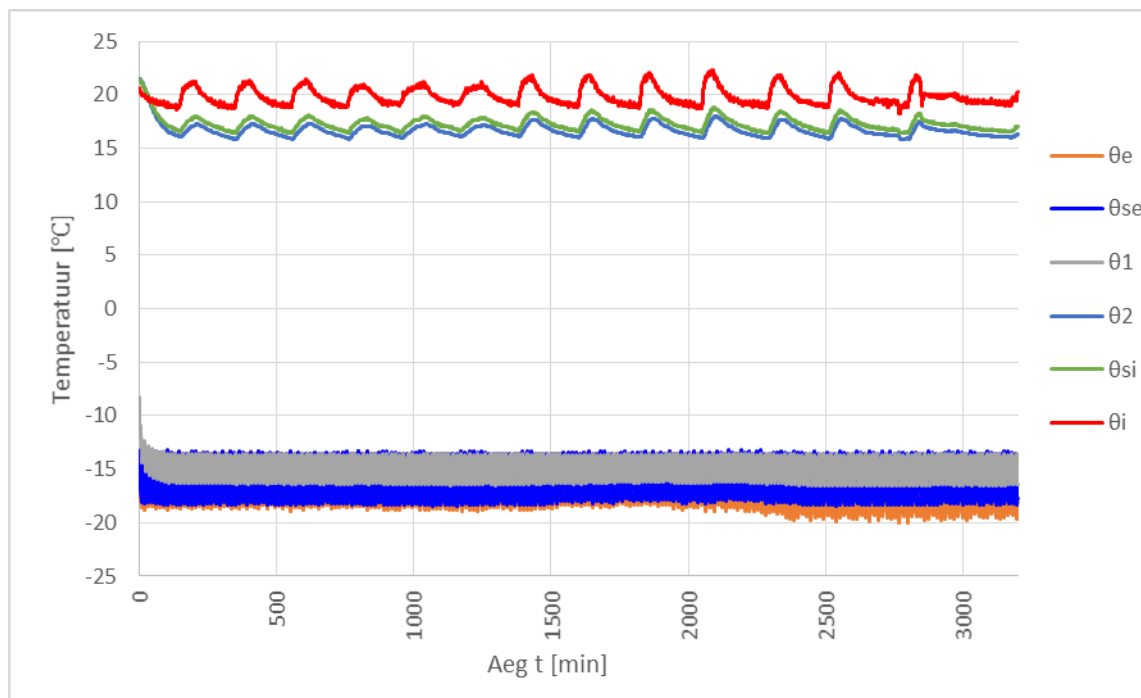
**Tabel L.4.3.** Soojuserijuhtivuste teisendamine. Kergbetooni segude koostised on toodud tabelis 4.2

Nr.	Tähis	Katsekeha (paksus mm)	Soojusvoog	Soojuserijuhtivus					Temperatuuri teisendustegur		Teisenduskoefitsent
			q	λ	λ <sub>10</sub>	Keskm. λ <sub>10</sub>	λ <sub>23</sub>	Keskm. λ <sub>23</sub>	F <sub>T.10</sub>	F <sub>T.23</sub>	f <sub>T</sub>
			W/m2	W/mK	W/mK	W/mK	W/mK	W/mK	1/K	1/K	1/K
Villa plaadid											
1.	KVP-1	Kanepivillaplaat 1 (50+50)	14,97	0,044	0,048	0,047	0,050	0,049	1,033	1,081	0,0035
2.	KVP-2	Kanepivillaplaat 2 (50+50)	14,59	0,043	0,047		0,049		1,033	1,081	0,0035
3.	KVP-3	Kanepivillaplaat 3 (50+50)	14,29	0,043	0,047		0,049		1,033	1,081	0,0035
4.	PVP-1	Puitivillaplaat 1 (40+40)	12,65	0,037	0,043	0,042	0,045	0,044	1,041	1,090	0,0035
5.	PVP-2	Puitivillaplaat 2 (40+40)	12,61	0,035	0,041		0,043		1,039	1,088	0,0035
Puistematerjal											
6.	PV-1*	Puitvill 1 (100)	15,84	0,048	0,049	*	0,052	*	1,033	1,081	0,0035
7.	PV-2	Puitvill 2 (100)	13,25	0,039	0,041	0,041	0,043	0,043	1,033	1,081	0,0035
8.	PV-3	Puitvill 3 (100)	13,11	0,039	0,041		0,043		1,033	1,081	0,0035
9.	PV-4	Puitvill 4 (100)	13,14	0,039	0,041		0,043		1,033	1,081	0,0035
10.	KL-1	Kanepiluu 1 (100)	15,26	0,045	0,052	0,053	0,054	0,055	1,035	1,084	0,0035
11.	KL-2	Kanepiluu 2 (100)	16,20	0,047	0,054		0,056		1,037	1,086	0,0035
12.	KL-3	Kanepiluu 3 (100)	16,27	0,047	0,054		0,056		1,038	1,086	0,0035
Kergbetoonid											
13.	MK1-1	Kergbetoon (100)	30,65	0,110	0,113	0,113	0,117	0,117	1,029	1,068	0,00281
14.	MK1-2	Kergbetoon (100)	31,44	0,110	0,113		0,117		1,028	1,066	0,00281
15.	MK2-1	Kergbetoon (100)	29,67	0,108	0,116	0,116	0,120	0,121	1,030	1,068	0,00285
16.	MK2-2	Kergbetoon (100)	29,48	0,109	0,117		0,121		1,029	1,067	0,00282
17.	MK4-1	Kergbetoon (100)	26,70	0,088	0,098	0,097	0,102	0,101	1,038	1,079	0,00300
18.	MK4-2	Kergbetoon (100)	27,19	0,085	0,096		0,099		1,038	1,079	0,00300
19.	MK4-3*	Kergbetoon (100)	32,86	0,120	0,116	*	0,120	*	1,029	1,065	0,00261
20.	MK5-1	Kergbetoon (100)	30,43	0,111	0,119	0,118	0,123	0,122	1,032	1,070	0,00278
21.	MK5-2	Kergbetoon (100)	30,68	0,110	0,117		0,122		1,033	1,071	0,00281
22.	MK5-3	Kergbetoon (100)	28,54	0,109	0,116		0,121		1,028	1,067	0,00282

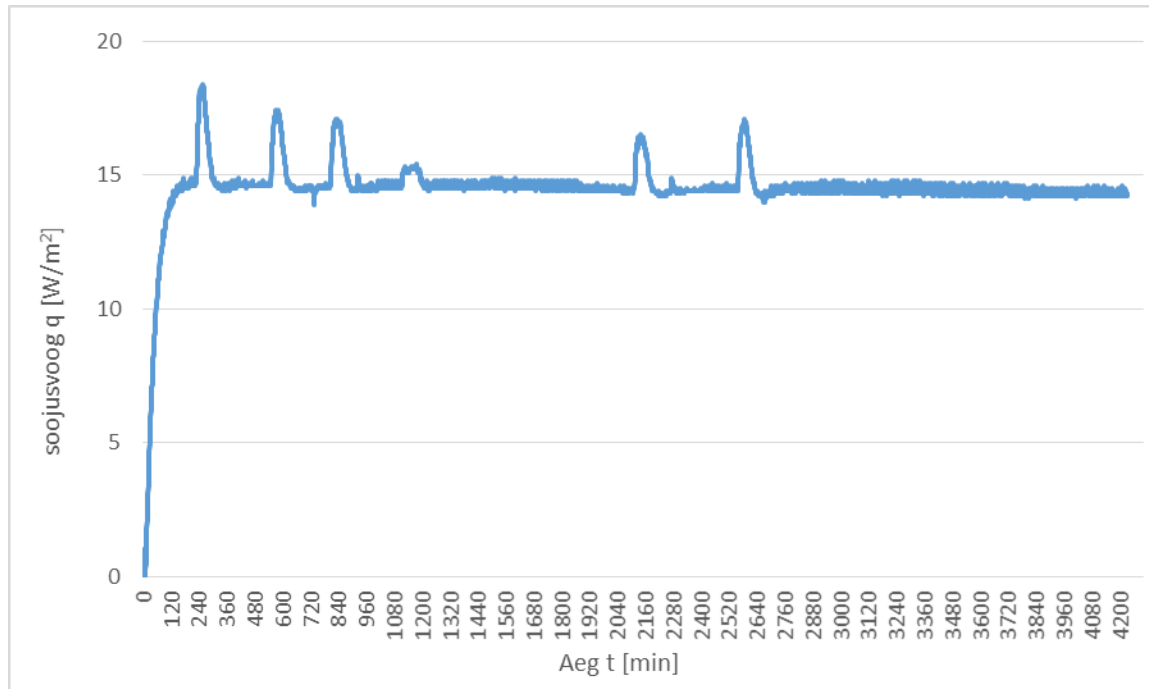
\* Katsekeha tihedus liiga suure erinevusega teistest samas seerias olevatest katsekehadest. Kõigist keskmiste arvutustest välja jäetud.



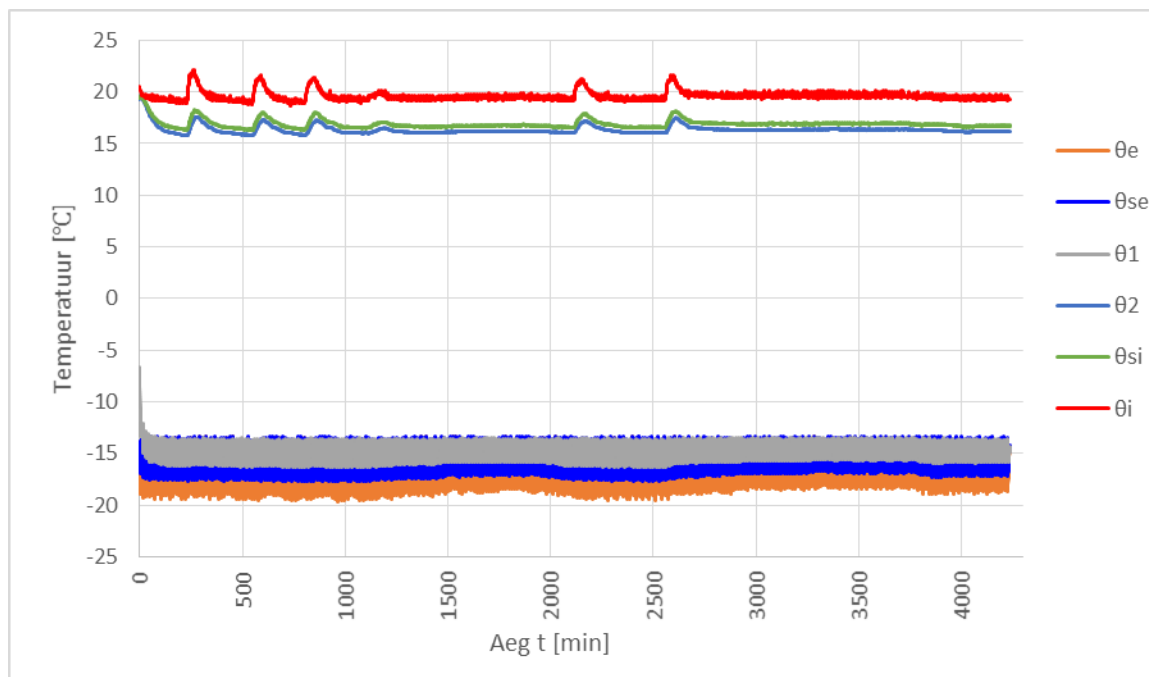
Joonis L.4.1. Katsekeha KVP-1 soojusvoo muutus ajas



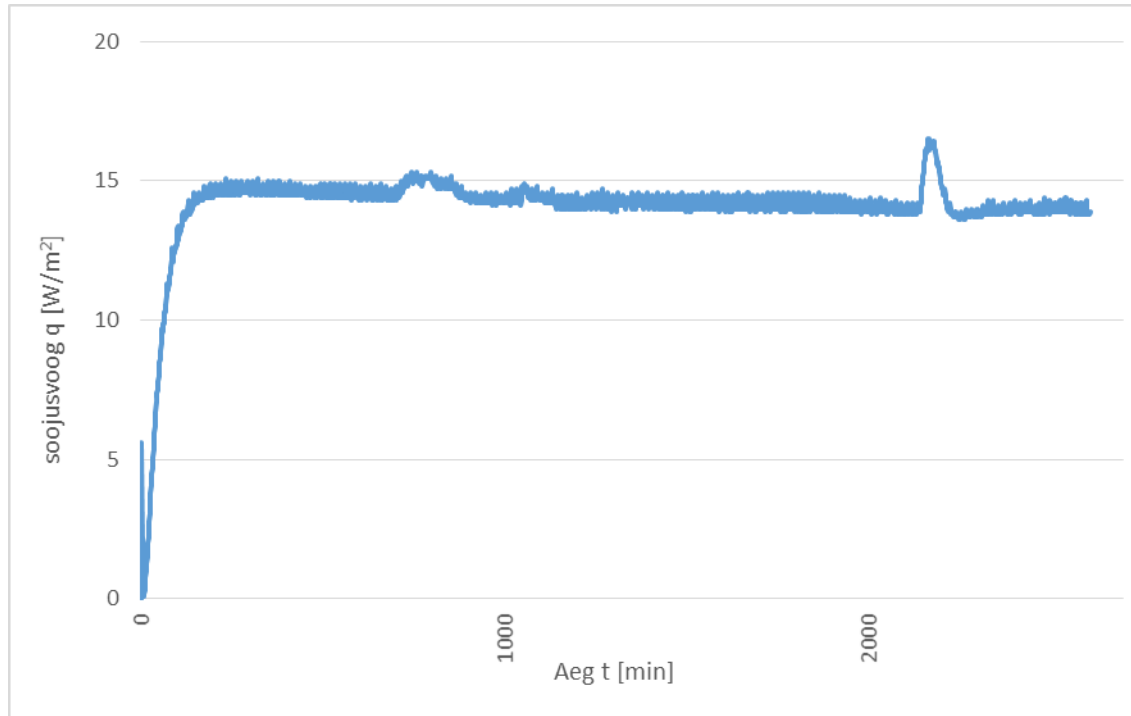
Joonis L.4.2. Katsekeha KVP-1 temperatuuri muutus ajas



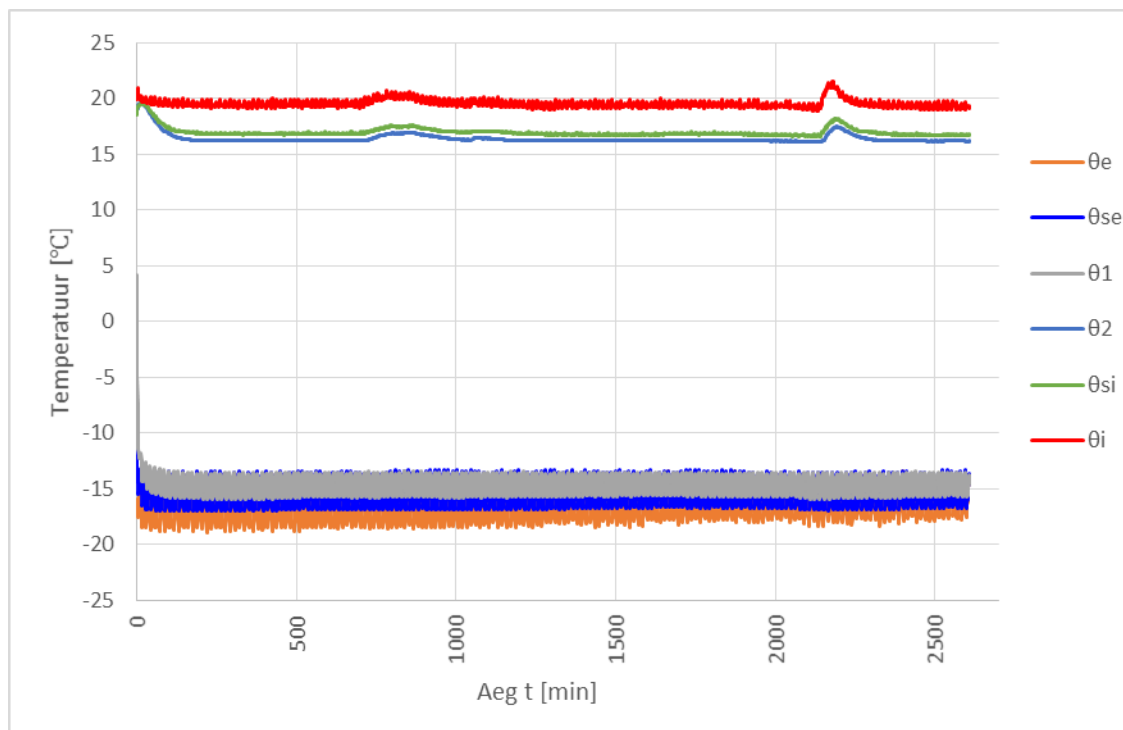
Joonis L.4.3. Katsekeha KVP-2 soojusvoo muutus ajas



Joonis L.4.4. Katsekeha KVP-2 temperatuuri muutus ajas

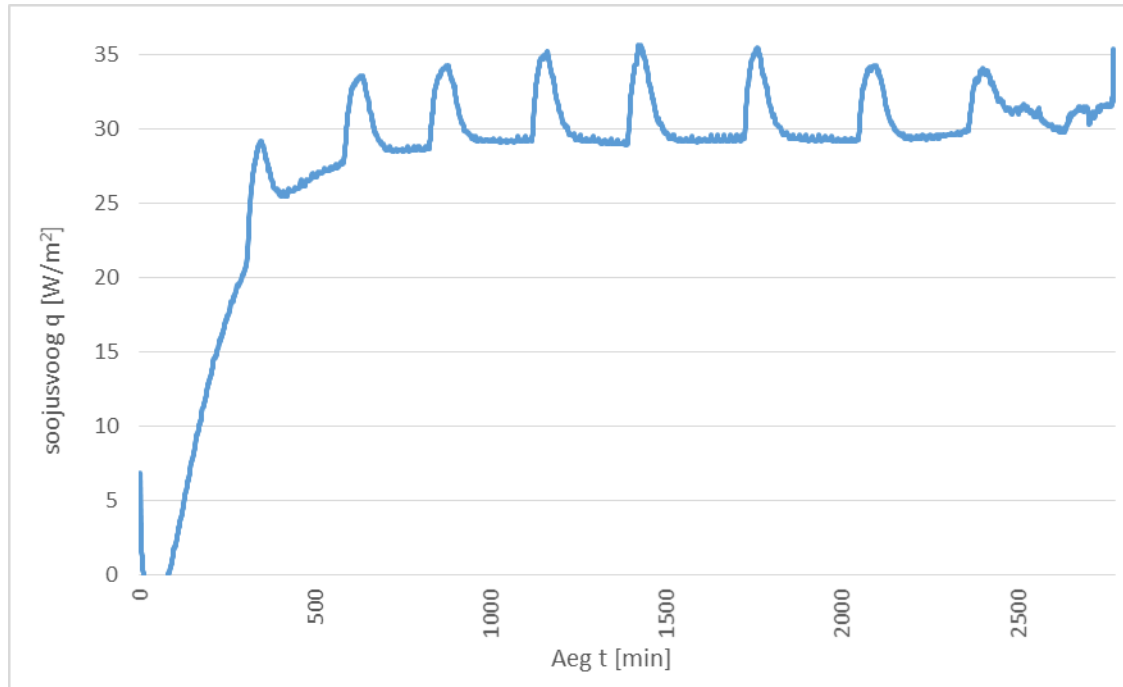


Joonis L.4.5. Katsekeha KVP-3 soojusvoo muutus ajas

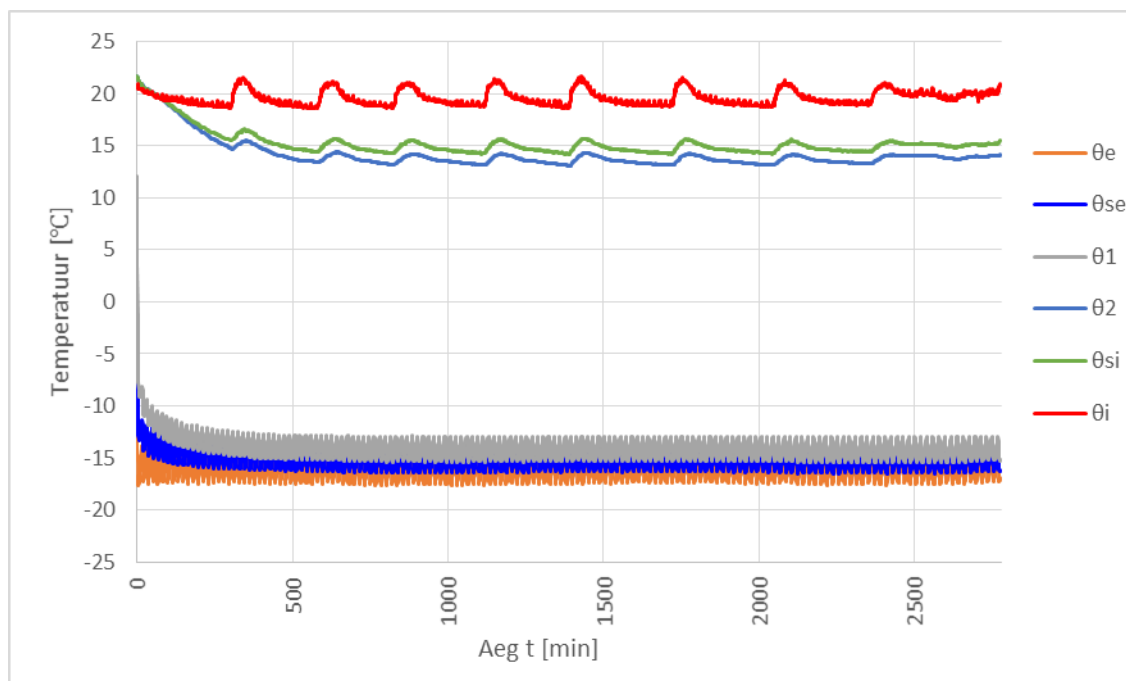


Joonis L.4.6. Katsekeha KVP-3 temperatuuri muutus ajas

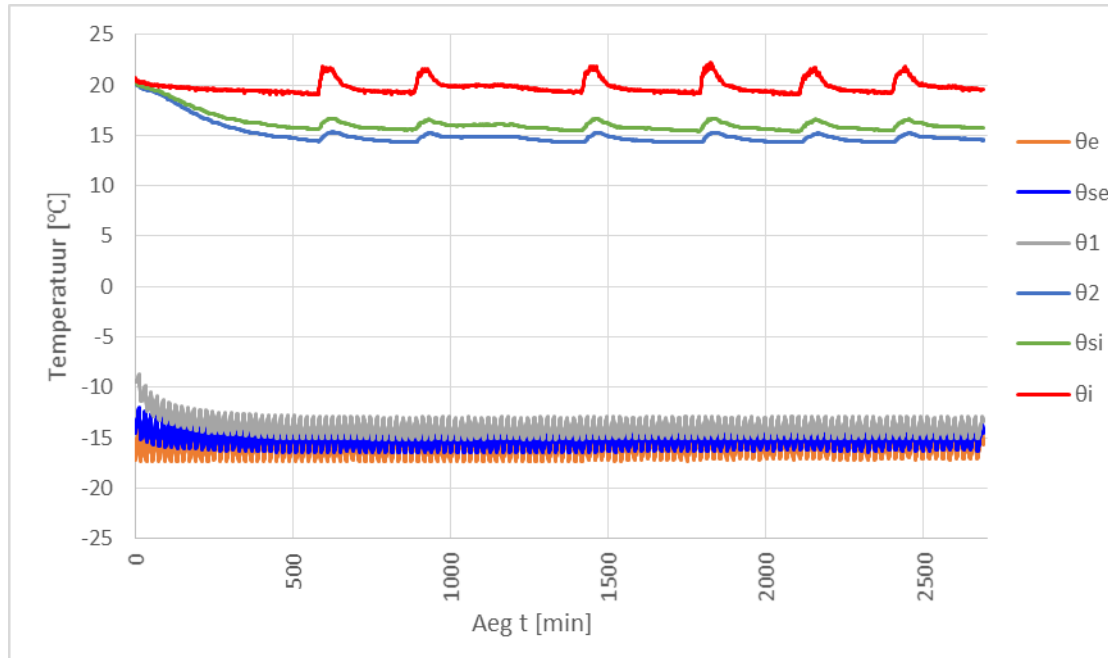




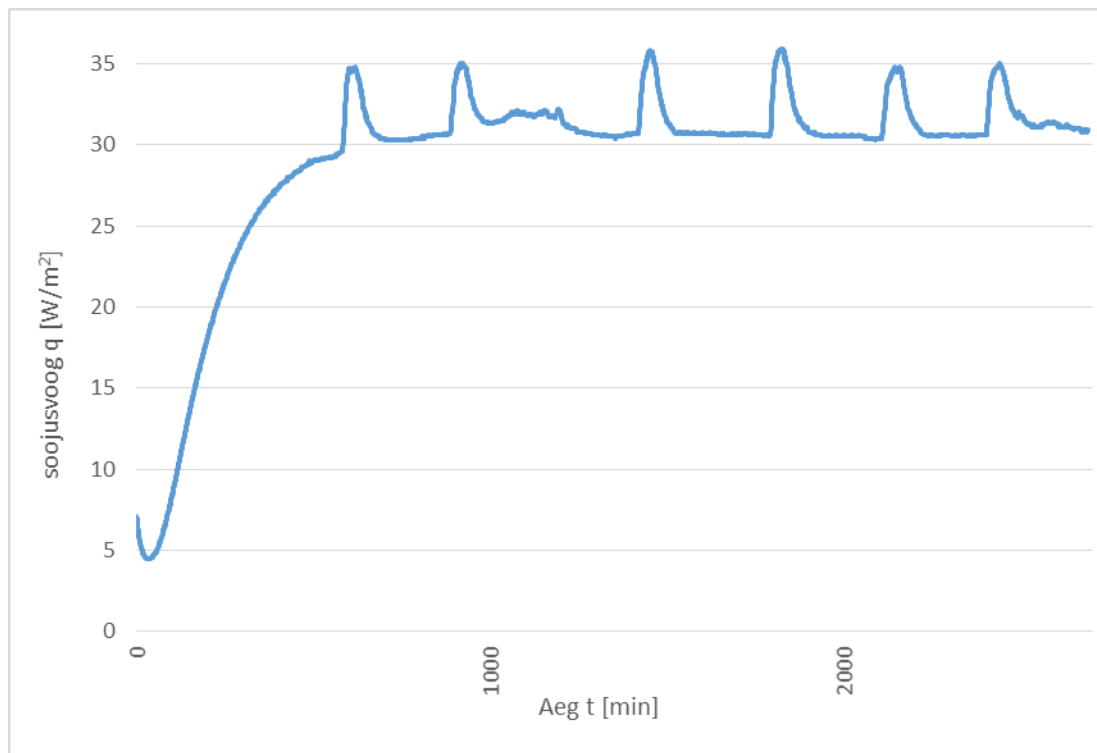
Joonis L.4.7. Katsekeha MK1-1 soojusvoo muutus ajas



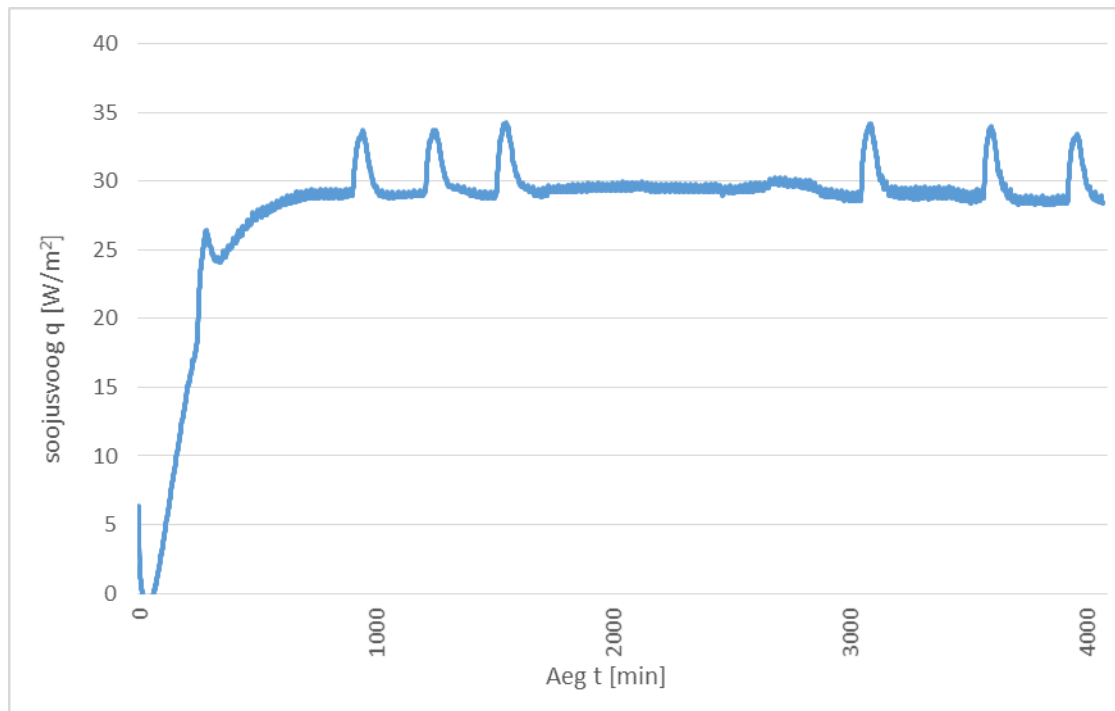
Joonis L.4.8. Katsekeha MK1-1 temperatuuri muutus aja



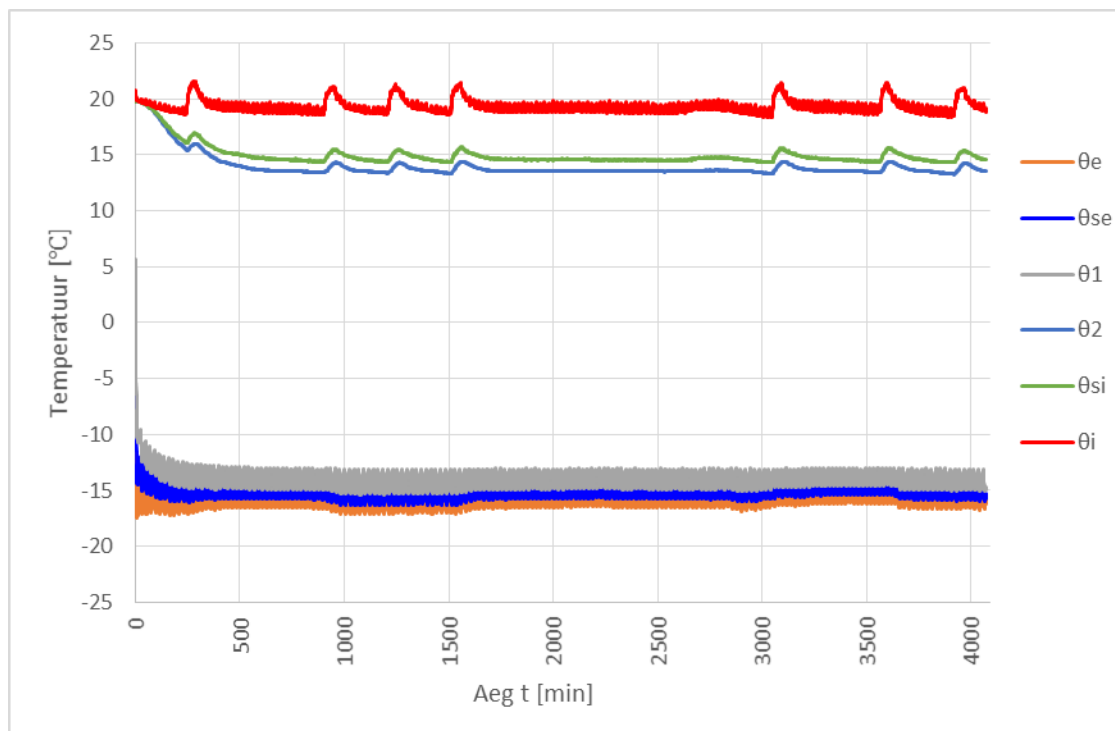
Joonis L.4.9. Katsekeha MK1-2 temperatuuri muutus ajas



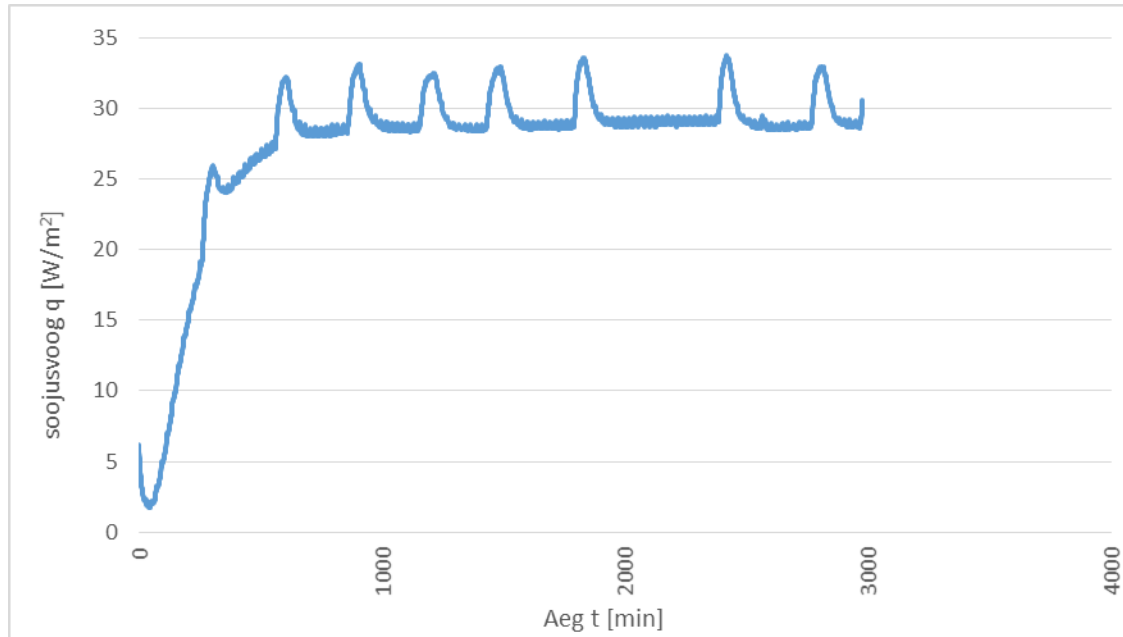
Joonis L.4.10. Katsekeha MK1-2 soojusvoo muutus aja



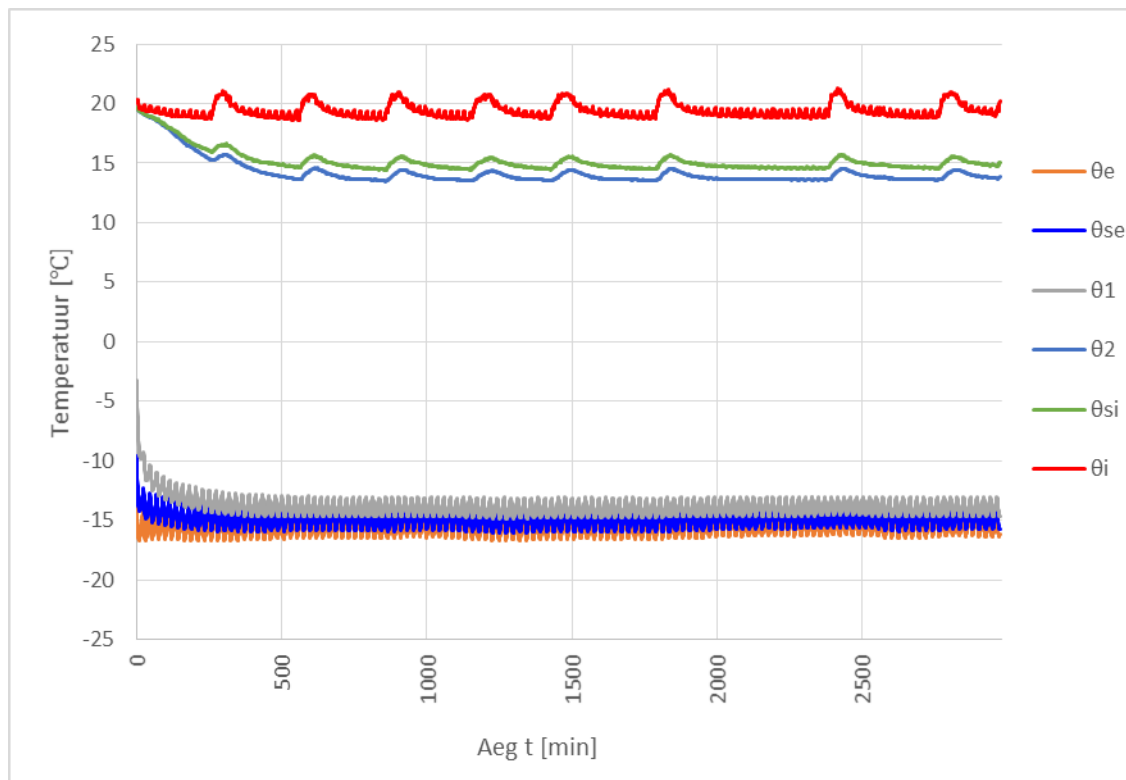
Joonis L.4.11. Katsekeha MK2-1 soojusvoo muutus ajas



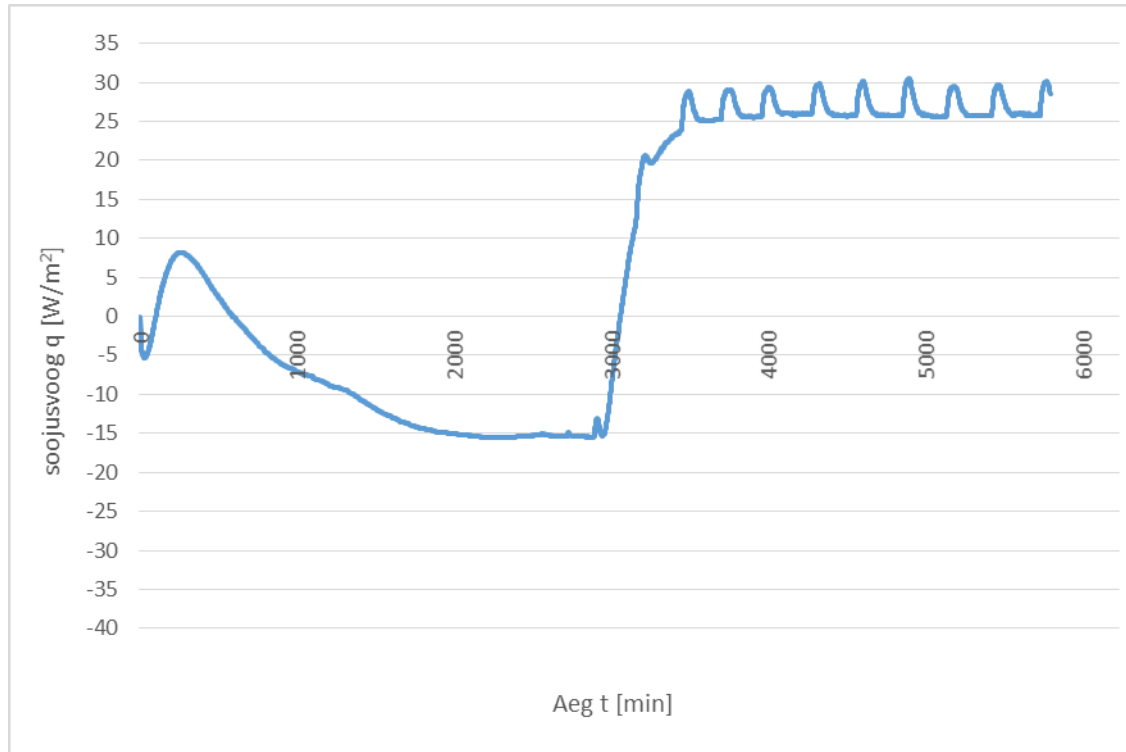
Joonis L.4.12. Katsekeha MK2-1 temperatuuri muutus ajas



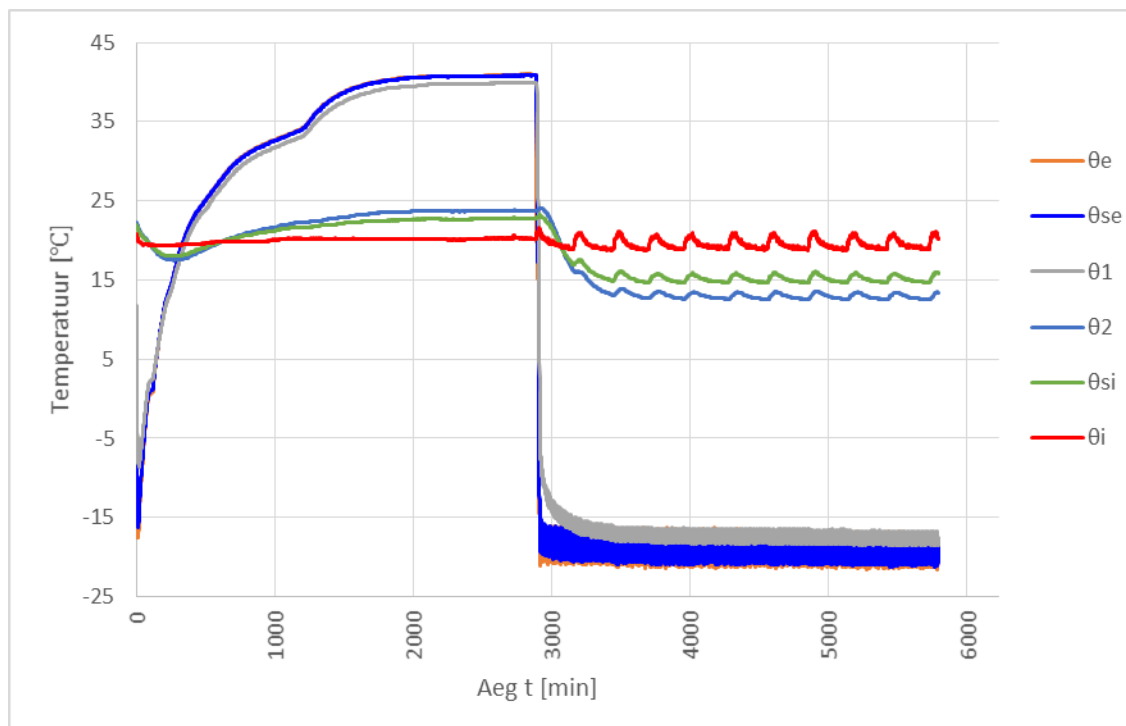
Joonis L.4.13. Katsekeha MK2-2 soojusvoo muutus ajas



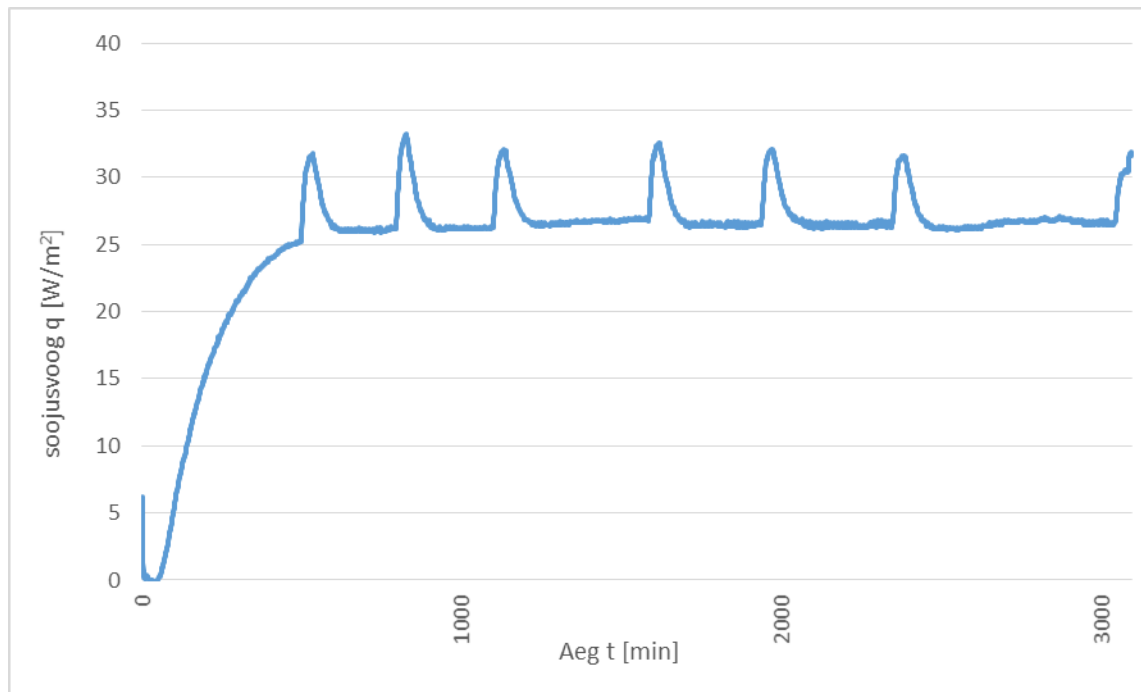
Joonis L.4.14. Katsekeha MK2-2 s temperatuuri muutus ajas



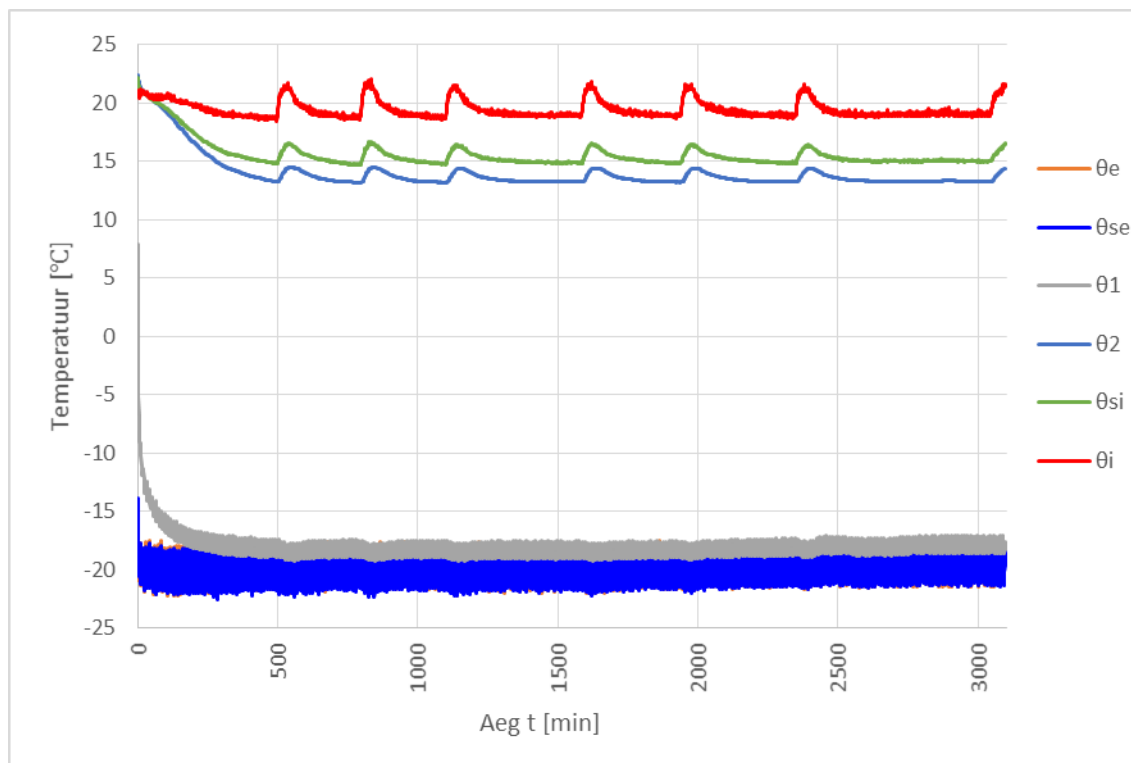
Joonis L.4.15. Katsekeha MK4-1 soojusvoo muutus ajas



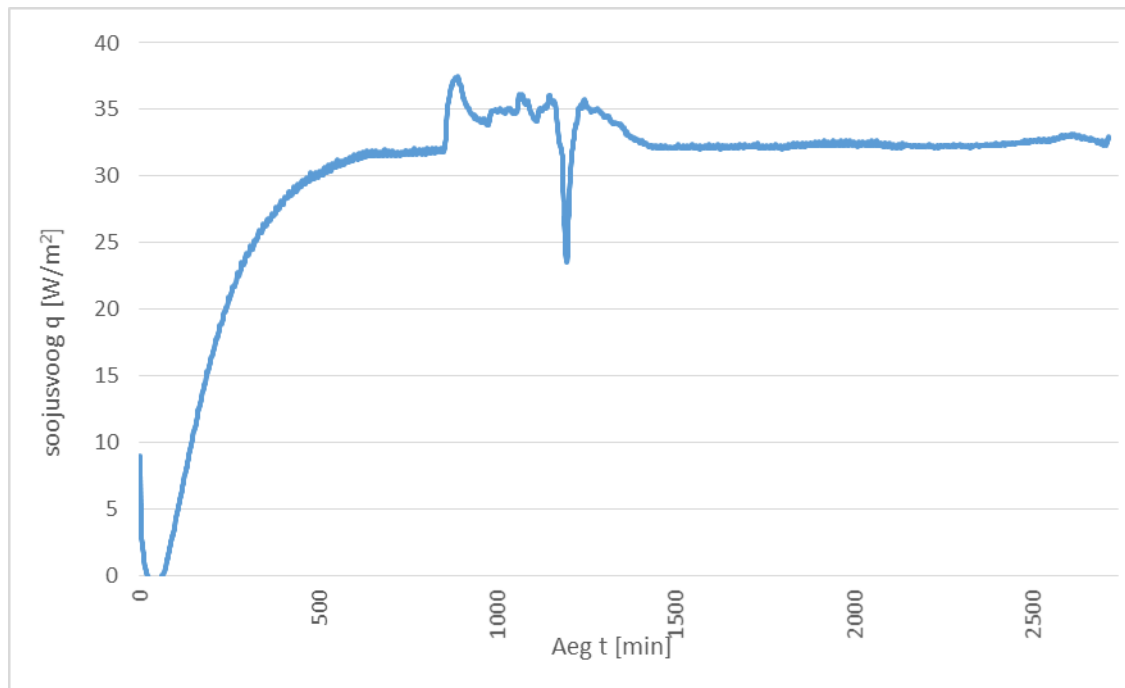
Joonis L.4.16. Katsekeha MK4-1 temperatuuri muutus ajas



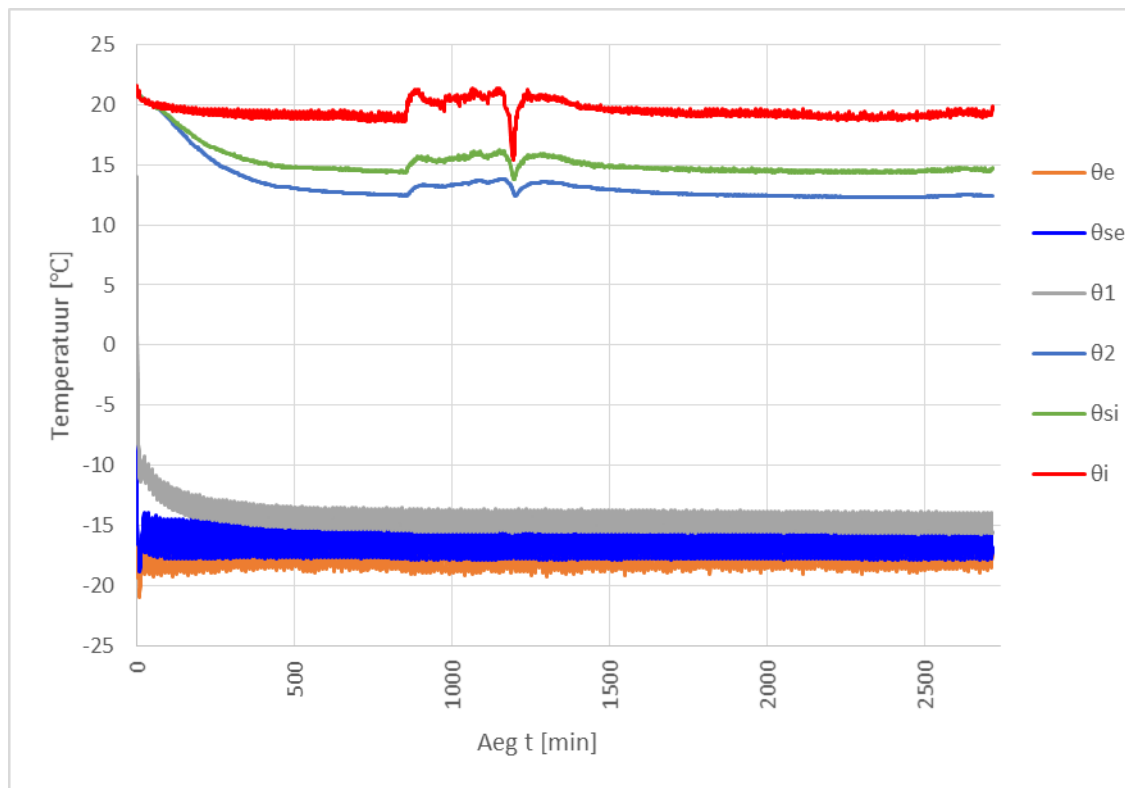
Joonis L.4.17. Katsekeha MK4-2 soojusvoo muutus ajas



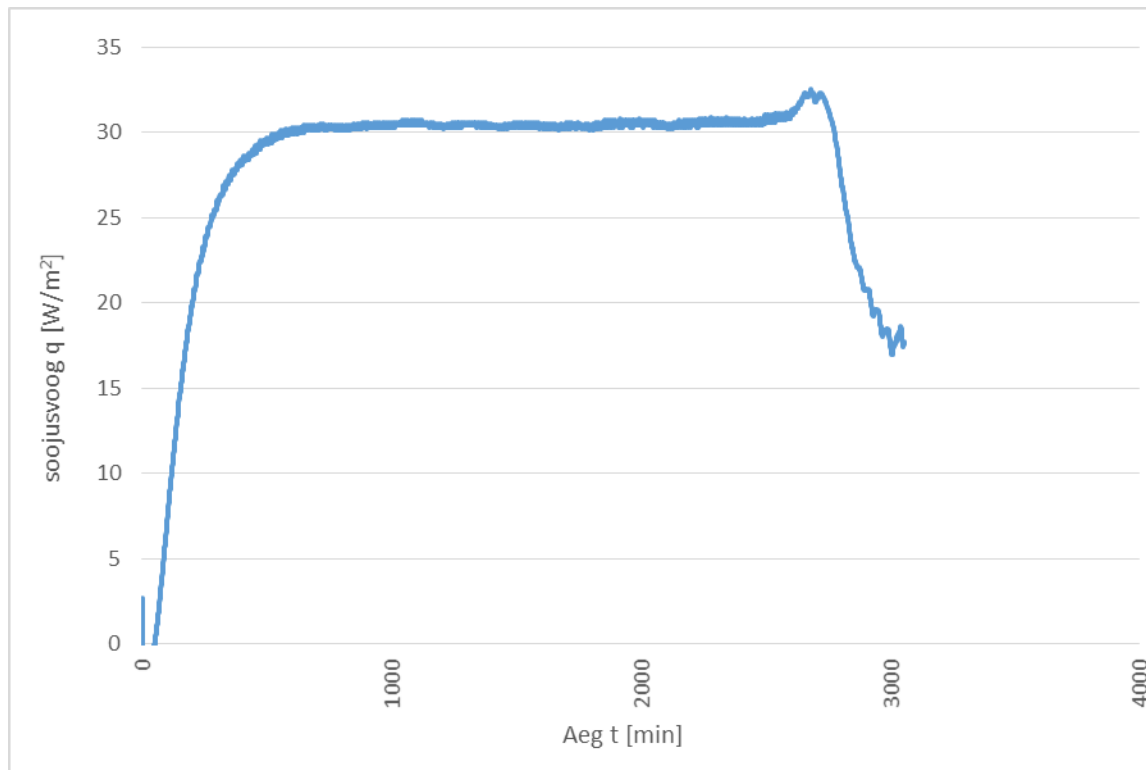
Joonis L.4.18. Katsekeha MK4-2 temperatuuri muutus ajas



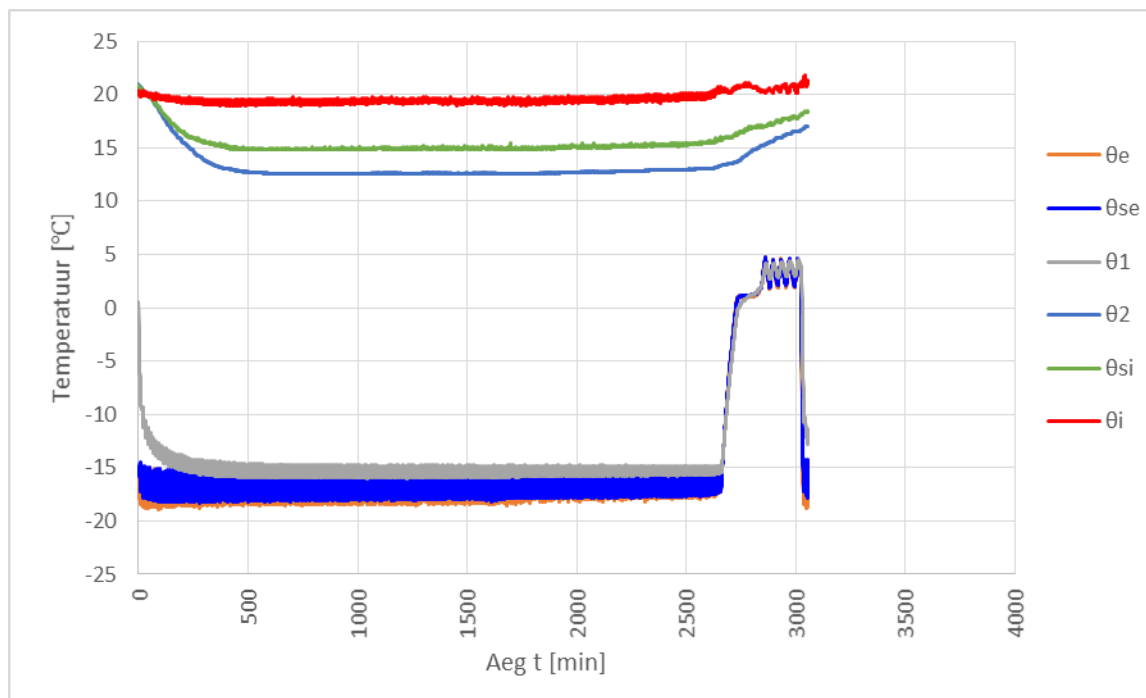
Joonis L.4.19. Katsekeha MK4-3 soojusvoo muutus ajas



Joonis L.4.20. Katsekeha MK4-3 temperatuuri muutus ajas

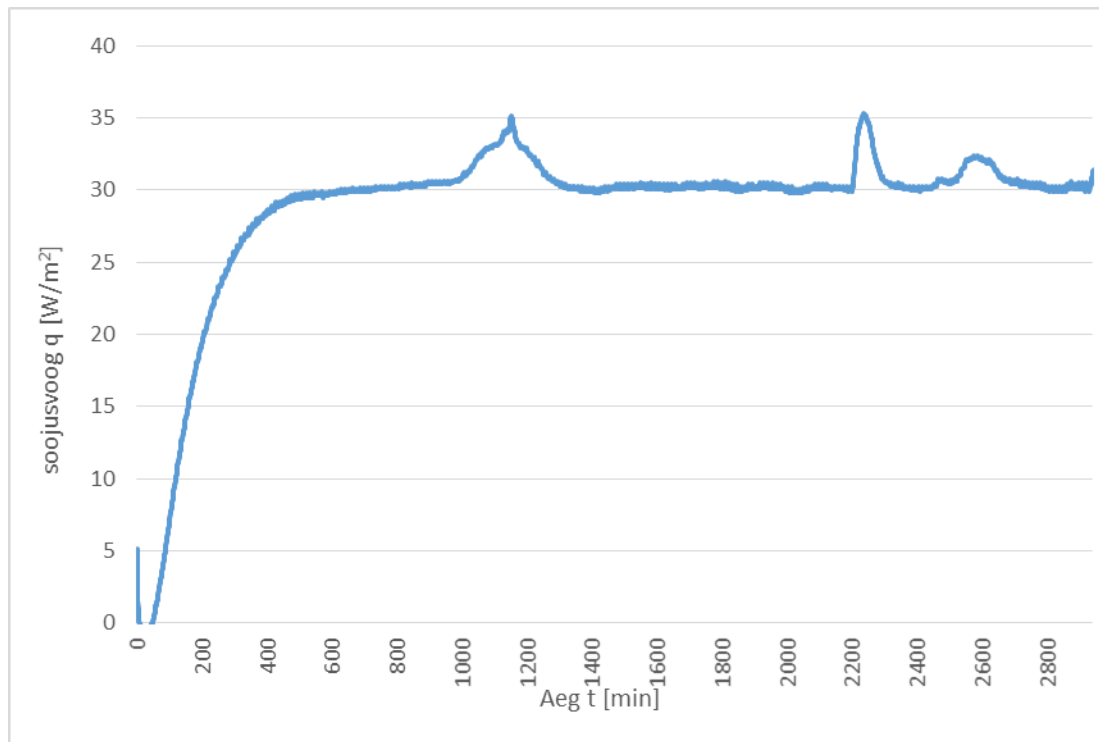


Joonis L.4.21. Katsekeha MK5-1 soojusvoo muutus ajas

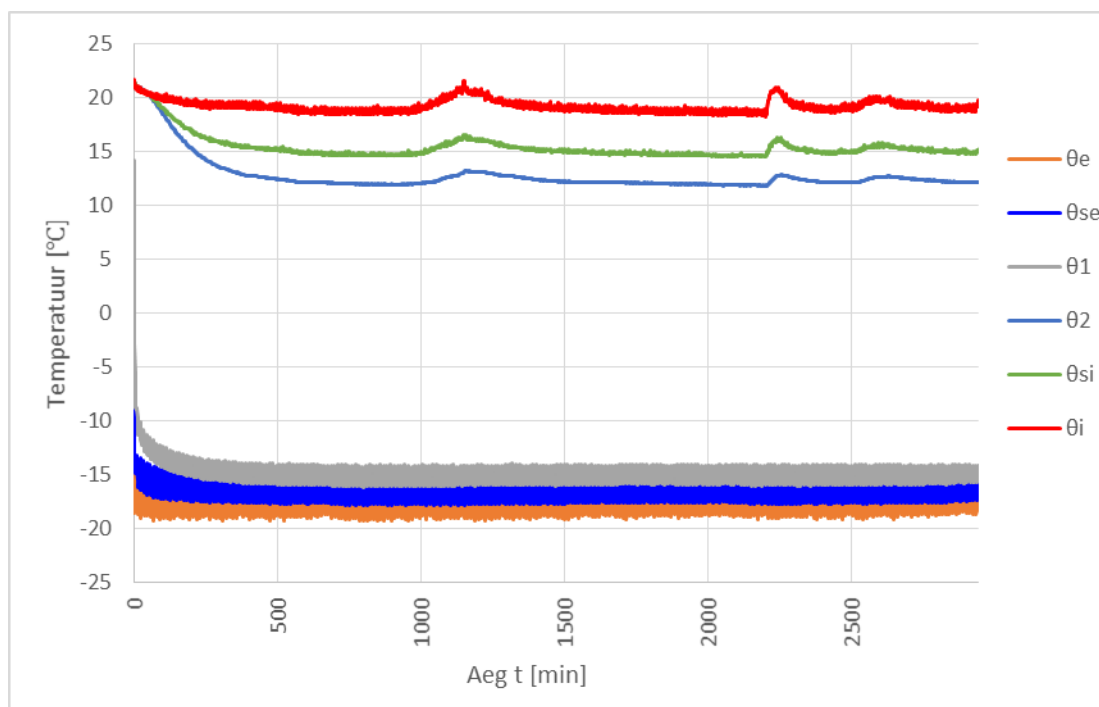


Joonis L.4.22. Katsekeha MK5-1 temperatuuri muutus ajas

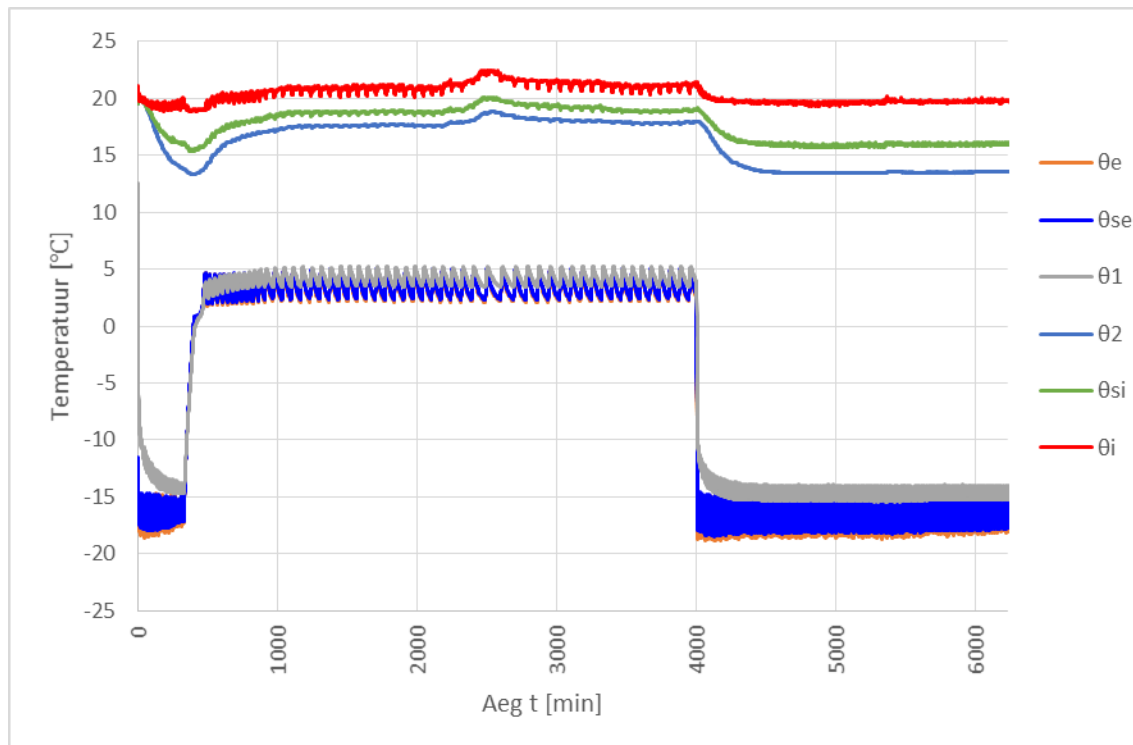




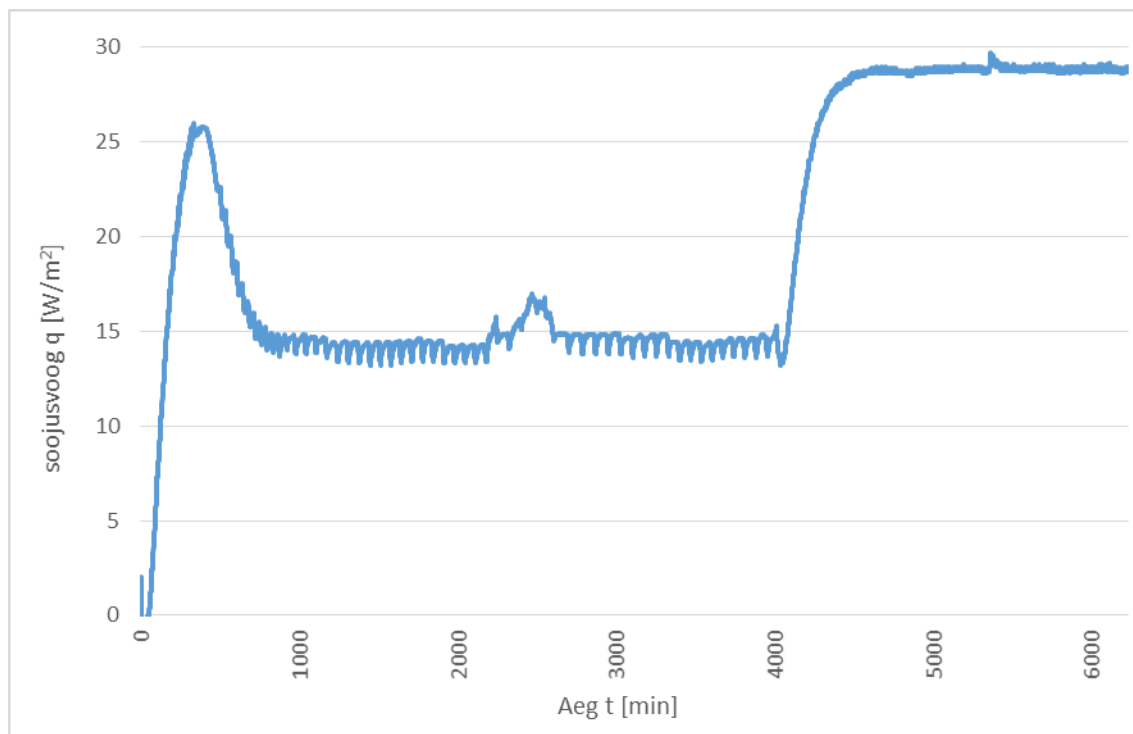
Joonis L.4.23. Katsekeha MK5-2 soojusvoo muutus ajas



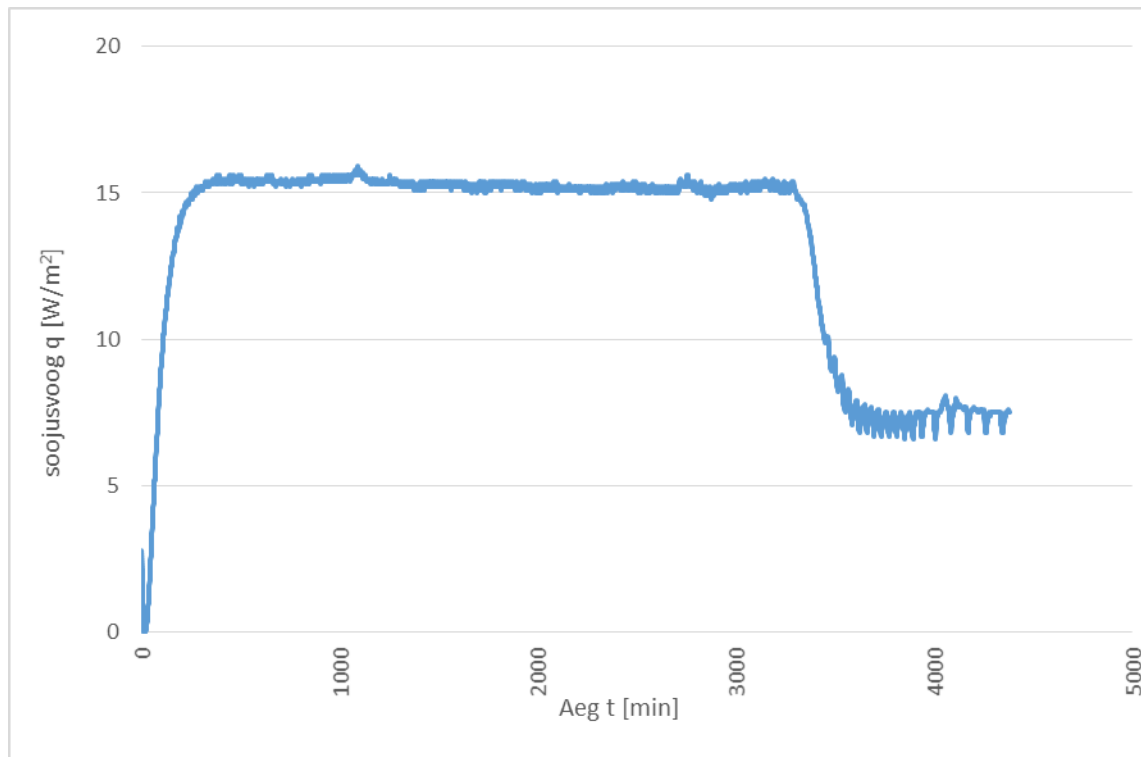
Joonis L.4.24. Katsekeha MK5-2 temperatuuri muutus ajas



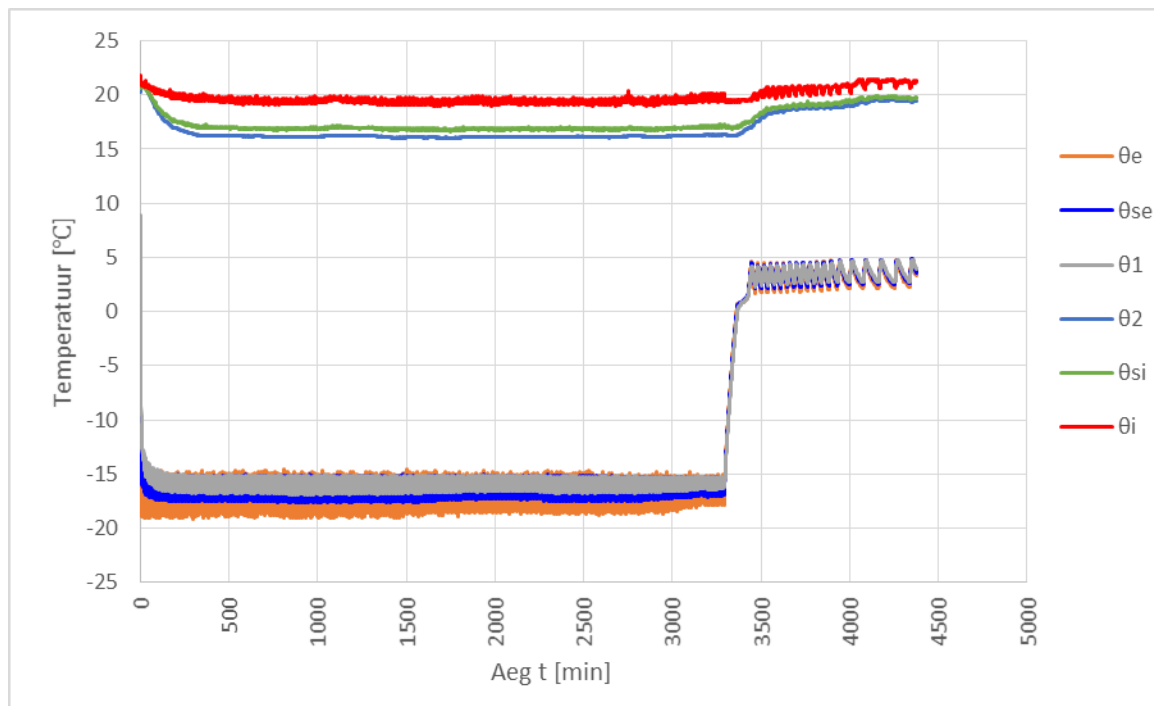
Joonis L.4.25. Katsekeha MK5-3 temperatuuri muutus ajas



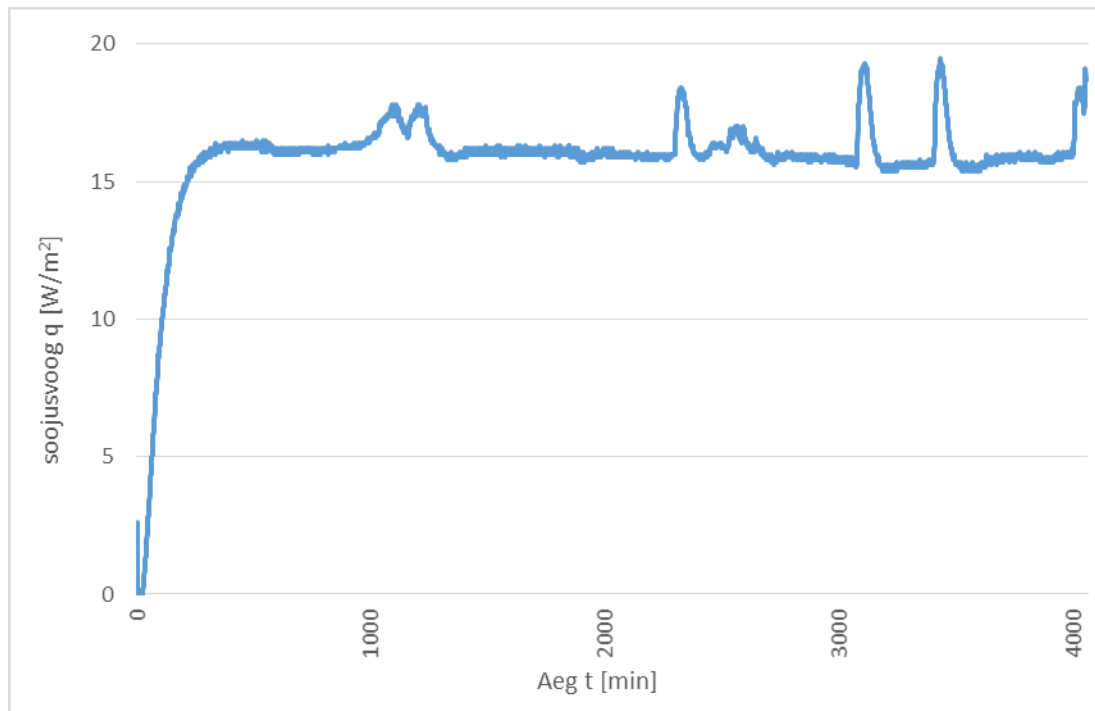
Joonis L.4.26. Katsekeha MK5-3 soojusvoo muutus ajas



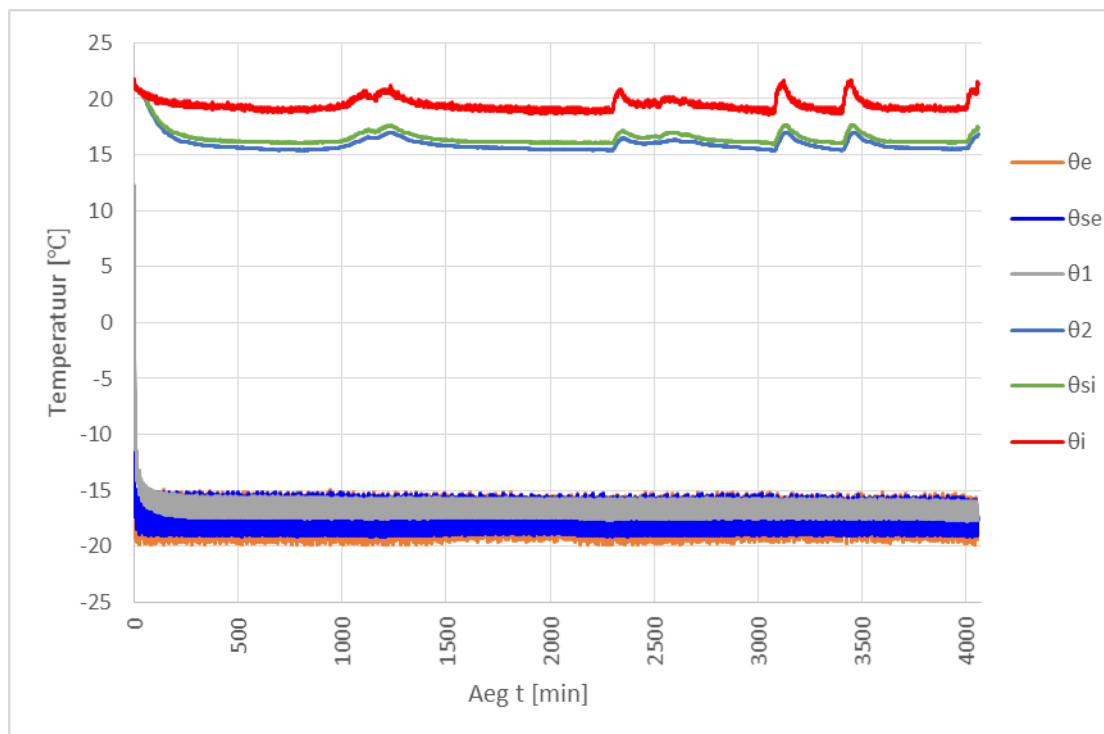
Joonis L.4.27. Katsekeha KL-1 soojusvoo muutus ajas



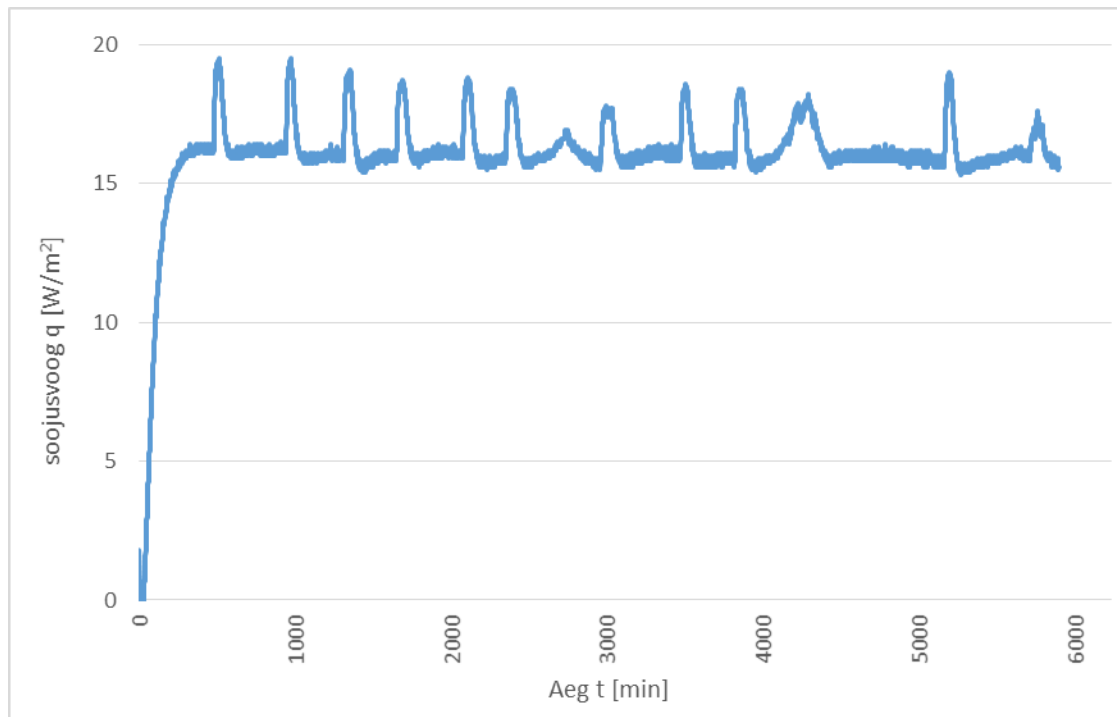
Joonis L.4.28. Katsekeha KL-1 temperatuuri muutus ajas



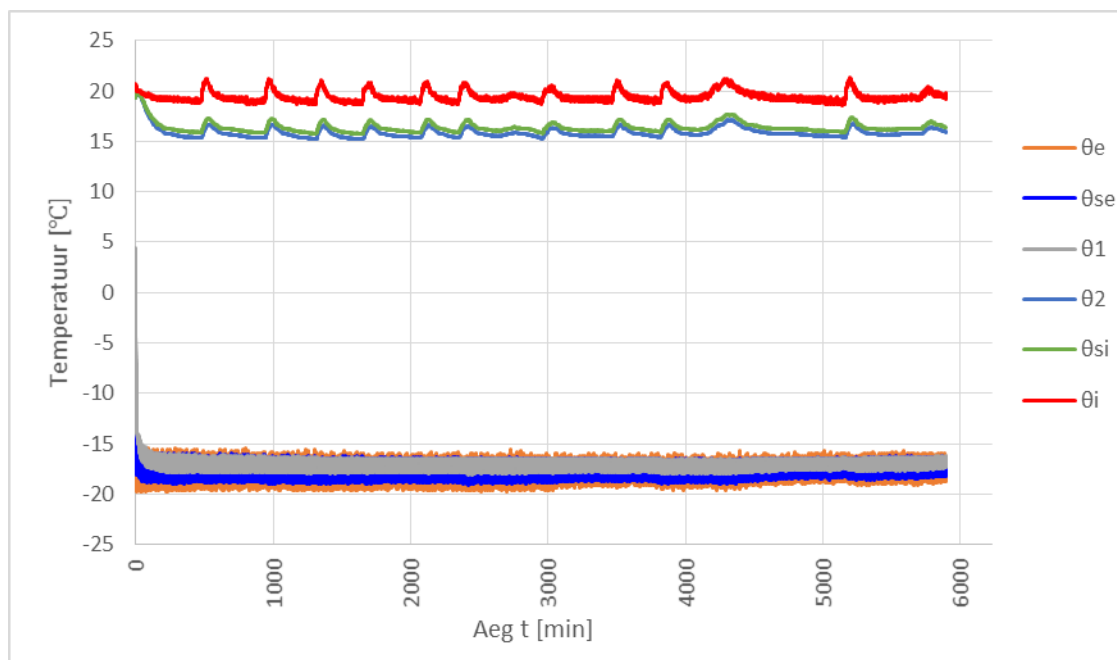
Joonis L.4.29. Katsekeha KL-2 soojusvoo muutus ajas



Joonis L.4.30. Katsekeha KL-2 temperatuuri muutus ajas



Joonis L.4.31. Katsekeha KL-3 soojusvoo muutus ajas



Joonis L.4.32. Katsekeha KL-3 temperatuuri muutus ajas

## Lisa 5 — Adsorptsiooni katsekehade andmed

**Tabel L.5.1.** Adsorptsiooni katsekehade andmed. Kergbetooni segude koostised on toodud tabelis 5.1

Tähis	Katsekeha	Pikkus	Laius	Kõrgus	Ruumala	Tihedus
		A	B	H	V	ρ
		mm	mm	mm	m³	kg/m³
Villa plaadid						
KVP 1	Kanepivillaplaat 1	104,15	102,03	45	0,00048	68,7
KVP 2	Kanepivillaplaat 2	104,29	101,56	45	0,00048	67,5
KVP 3	Kanepivillaplaat 3	101,67	103,73	45	0,00047	69,4
PVP 1	Puitvillaplaat 1	99,73	99,40	40	0,00040	66,6
PVP 2	Puitvillaplaat 2	99,93	99,93	40	0,00040	65,1
PVP 3	Puitvillaplaat 3	100,25	99,60	40	0,00040	64,2
Kergbetoonid						
MK1-1	Kergbetoon MK1-1	106,32	103,21	99,88	0,00110	508,2
MK1-2	Kergbetoon MK1-2	104,67	102,25	100,16	0,00107	499,7
MK1-3	Kergbetoon MK1-3	101,83	105,72	100,75	0,00108	491,9
MK2-1	Kergbetoon MK2-1	108,23	106,36	102,48	0,00118	528,9
MK2-2	Kergbetoon MK2-2	104,90	106,21	101,69	0,00113	528,1
MK2-3	Kergbetoon MK2-3	105,43	104,21	101,38	0,00111	527,1
MK4-1	Kergbetoon MK4-1	99,12	95,44	99,27	0,00094	566,7
MK4-2	Kergbetoon MK4-2	98,93	77,29	98,99	0,00076	745,5
MK4-3	Kergbetoon MK4-3	99,41	99,30	97,51	0,00096	398,6
MK5-1	Kergbetoon MK5-1	98,32	98,55	97,79	0,00095	586,3
MK5-2	Kergbetoon MK5-2	98,20	98,26	98,29	0,00095	575,9
MK5-3	Kergbetoon MK5-3	98,45	98,38	97,56	0,00094	601,9

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks  
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Denis Pappel  
sünniaeg 16.05.1992

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö  
Kanepist soojusisolatsioonimaterjalide omaduste uurimine,  
mille juhendaja on nooremteadur Martti-Jaan Miljan ja professor Jaan Miljan,
  - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
  - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
  - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega  
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_

allkiri

Tartu, 22.05.2017

---

**Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)